

RELIURE EN TOILE

EXCLU
DU
PRÉT

IMBERT & BERTIN-SANS

—
TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE
DE PHYSIQUE

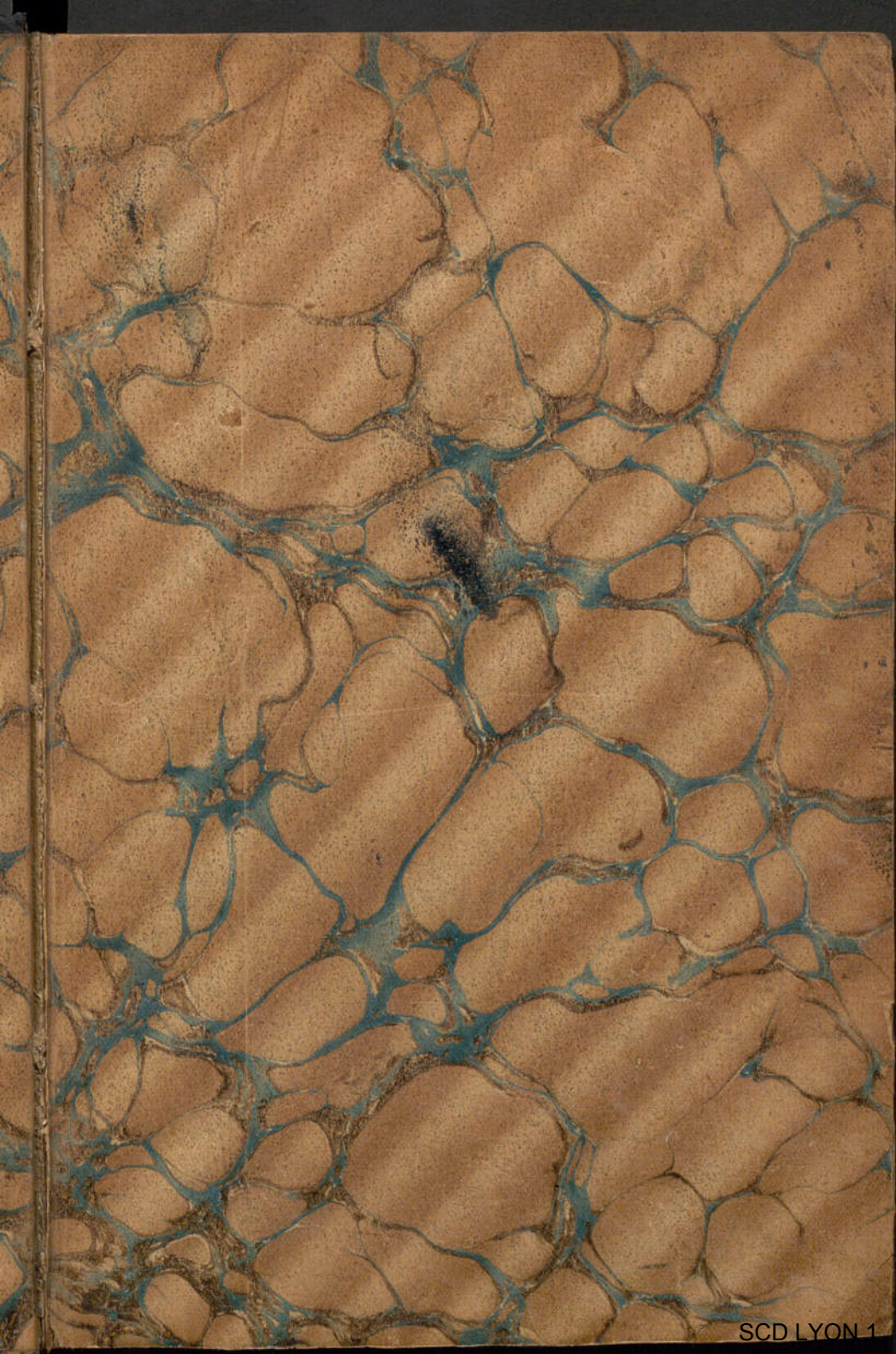
2

40,378



SCD LYON 1





TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE
DE PHYSIQUE

TOME II

104



68-95. — CORBEIL. Imprimerie Éd. CARTÉ.

40,378

TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE 40.378
DE PHYSIQUE

A L'USAGE DES CANDIDATS
Au Certificat d'Études chimiques, physiques et naturelles

PAR LES DOCTEURS

Armand IMBERT
Licencié ès sciences mathématiques,
Docteur ès sciences physiques,
Professeur à la Faculté de médecine
de Montpellier.

Henri BERTIN-SANS *Docteur*
Licencié ès sciences physiques,
Chef des travaux de physique biologique
à la Faculté de médecine
de Montpellier.

TOME SECOND

OPTIQUE

ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME — MÉTÉOROLOGIE

AVEC PLANCHES EN COULEUR
ET 218 FIGURES INTERCALÉES DANS LE TEXTE
(Fig. 247 à 464)



PARIS

LIBRAIRIE J.-B. BAILLIÈRE ET FILS

19, rue Hautefeuille, près du boulevard Saint-Germain

1897

Tous droits réservés.

PLACEMENT DES PLANCHES

PLANCHE I. Positions relatives de l'image et de l'objet et régions conjuguées pour un miroir sphérique concave.....	562-563
PLANCHE II. Positions relatives de l'image et de l'objet et régions conjuguées pour un dioptré sphérique convergent...	602-603
PLANCHES III-IV. Positions relatives de l'image et de l'objet et régions conjuguées pour une lentille convergente et pour une lentille divergente.....	612-633
PLANCHE V. Aberration chromatique des lentilles sphériques.	688-689
PLANCHE VI. Spectre solaire et spectres de diverses vapeurs incandescentes.....	710-711

LIVRE IV

OPTIQUE

GÉNÉRALITÉS

375. **Objet du livre.** — Il existe au fond de l'œil des animaux un nerf de *sensibilité spéciale* appelé *nerf optique*; on appelle *sensation lumineuse* la sensation qui résulte de l'excitation de ce nerf, excitation qui peut être produite par des actions diverses, mécaniques, chimiques, électriques, etc., et plus spécialement par un agent physique d'une nature particulière. C'est cet agent physique, cause habituelle de l'excitation du nerf optique et des sensations lumineuses, qui a reçu le nom de *lumière* ou d'*agent lumineux*.

L'*Optique* est la branche de la Physique qui comprend l'étude des phénomènes auxquels la lumière donne naissance.

376. **Sources lumineuses.** — On appelle *source lumineuse* tout corps qui émet de la lumière; le soleil, les étoiles, les corps en combustion vive, etc., sont donc des sources lumineuses.

Il n'est pas nécessaire, pour qu'un corps nous procure une sensation lumineuse, que ce corps soit lumineux par lui-même ou *photogène*, comme les sources de lumière que nous venons de citer; il suffit qu'il soit éclairé par une telle source et qu'il renvoie vers notre œil une partie de la lumière qu'il reçoit. Les corps non photogènes cessent d'ailleurs d'être visibles dès qu'on supprime la source qui les éclaire. La lune, qui n'émet pas de lumière propre, mais qui peut, dans certaines de ses positions successives, renvoyer vers la terre une quantité suffisante de la lumière qu'elle reçoit du soleil, est un exemple de corps lumineux non photogène; il en est de même des corps qui nous entourent et qui ne sont *visibles* qu'à la condition d'être éclairés par la lumière d'une

source naturelle ou artificielle et de renvoyer dans notre œil une quantité suffisante de la lumière reçue.

377. **Nature de la lumière.** — De même que tous les agents physiques, la lumière est constituée par un mouvement d'une nature particulière. On admet aujourd'hui, et cette hypothèse est si complètement vérifiée par l'expérience qu'elle est devenue une vérité indiscutable, on admet qu'un corps devient lumineux par lui-même lorsqu'il est le siège de mouvements vibratoires d'une certaine rapidité. Malgré les caractères très nettement distinctifs, et que nous indiquerons plus tard, qui existent entre les mouvements producteurs du son et les mouvements générateurs de la lumière, il existe une évidente analogie entre les phénomènes sonores et les phénomènes lumineux. De même, par exemple, que la transmission du son ne peut se faire qu'à travers un milieu élastique, de même l'existence d'un milieu élastique est nécessaire pour la transmission de la lumière depuis le corps lumineux jusqu'aux terminaisons du nerf optique dans l'organe de la vision. L'étude des conditions dans lesquelles se propage la lumière montre que ce milieu élastique est répandu dans tout l'univers et qu'il se trouve aussi bien dans le vide barométrique et dans celui des espaces interplanétaires que dans les corps pondérables. On donne à ce milieu le nom d'*éther*.

Dans la partie de ce Livre qui porte le titre d'*Optique physique*, nous insisterons plus longuement sur le mouvement vibratoire qui constitue la lumière et nous étudierons les phénomènes qui ont conduit les physiciens à admettre l'hypothèse précédente ou qui ont fourni de cette hypothèse autant de confirmations éclatantes.

Mais il existe toute une catégorie de phénomènes lumineux dont l'étude peut être faite et dont les lois peuvent être établies, avec une exactitude suffisante pour les nécessités de la pratique, sans qu'il soit nécessaire d'être fixé sur la nature intime de la lumière. Cette catégorie de phénomènes lumineux, la plus importante à connaître pour le médecin et pour le physiologiste, constitue l'*Optique géométrique*. C'est par l'étude de l'*Optique géométrique*, que nous commencerons, pour continuer par l'exposé, sous le titre de *Radiations*, d'un autre ensemble de phénomènes lumineux, qui nous révélera d'importantes analogies d'origine entre des classes différentes de phénomènes, et dont l'étude doit précéder celle de l'*Optique physique*.

I. — OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE

CHAPITRE PREMIER

PROPAGATION DE LA LUMIÈRE

378. **Corps transparents, corps translucides, corps opaques.** — Si l'on interpose, entre l'œil et une source lumineuse ou un objet éclairé, des lames de différents corps, on observe des effets différents suivant la nature du corps qui constitue la lame.

Tantôt on distingue, à travers la lame, la forme de la source ou de l'objet; la lame est alors dite *transparente*; tel est le cas du verre, de l'eau, de l'air, etc. Tantôt la lame permet seulement de reconnaître qu'il existe derrière elle une source lumineuse ou un objet éclairé, sans qu'il soit possible de distinguer la forme de l'objet ou de la source; on dit alors que la lame est *translucide*; c'est le cas du verre dépoli, du papier, etc. Enfin la lame est dite *opaque*, lorsqu'elle empêche de reconnaître l'existence même de la source lumineuse ou de l'objet éclairé placé en arrière; le bois, les métaux, etc., sont opaques à partir d'une épaisseur convenable. Ces distinctions n'ont cependant rien d'absolu.

379. **Propagation rectiligne de la lumière dans un milieu homogène.** — Nous admettrons en principe, au début de l'Optique géométrique, que dans tout milieu homogène la lumière se propage en ligne droite.

On obtient une vérification grossière de cette hypothèse en interposant un petit écran opaque entre l'œil et une source lumineuse de faibles dimensions; l'œil, en effet, cesse d'apercevoir la lumière lorsque l'écran se trouve sur la droite qui joint le centre de l'ouverture pupillaire au centre de la source.

Toutefois nous verrons, dans l'étude de l'Optique physique, que la lumière, grâce à sa nature, peut contourner les obstacles comme le fait le son, quoique dans des proportions infiniment moindres. Mais ces phénomènes de *diffraction* exigent, pour être constatés, de minutieuses dispositions expérimentales; ils ne sont pas directement visibles dans les expériences d'Optique géométrique et

n'entachent d'aucune erreur appréciable les résultats auxquels nous arriverons dans la première partie de ce Livre. Nous regarderons donc comme rigoureux le fait de la propagation rectiligne de la lumière dans un milieu homogène.

On donne le nom de *rayon lumineux* à la ligne (droite dans un milieu homogène) suivant laquelle la lumière se propage d'un point lumineux à un point quelconque de l'espace.

On appelle *faisceau lumineux* une réunion de rayons lumineux. Un faisceau est dit *homocentrique* lorsque les directions de tous les rayons qui le constituent concourent en un même point. Le faisceau est d'ailleurs appelé :

Parallèle, si le point de concours des rayons se trouve à l'infini ;

Convergent, si ce point se trouve à une distance finie, du côté vers lequel se propage la lumière du faisceau ;

Divergent, si ce même point est situé encore à une distance finie, mais du côté opposé à celui vers lequel la lumière du faisceau se dirige.

380. **Ombre et pénombre.** — Le principe de la propagation rectiligne de la lumière donne immédiatement l'explication des phénomènes d'ombre et de pénombre que l'on observe lorsqu'un corps opaque se trouve sur le trajet des rayons venus d'une source lumineuse.

En considérant les tangentes communes à la source et au corps opaque il est facile de voir que :

1° Lorsque la source est un point lumineux V (fig. 247), les

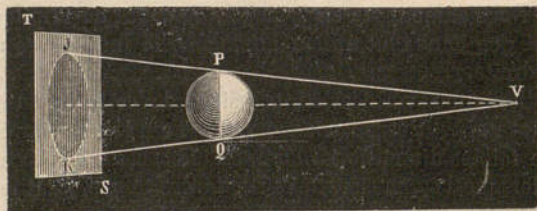


Fig. 247. — Ombre d'un corps éclairé par un point lumineux.

divers points de l'espace situés au delà du corps opaque PQ sont dans une obscurité complète ou reçoivent autant de lumière que si PQ n'existait pas, suivant qu'il sont situés à l'intérieur ou à l'extérieur du cône JVK. La portion de l'espace comprise dans ce

cône, au delà du corps, porte le nom de *cône d'ombre*. Si l'on place un écran TS au delà du corps opaque, son intersection par le cône d'ombre représente l'*ombre portée* par le corps sur l'écran. La forme de cette ombre dépend de la forme du corps opaque et de l'inclinaison de l'écran par rapport à l'axe du cône d'ombre ;

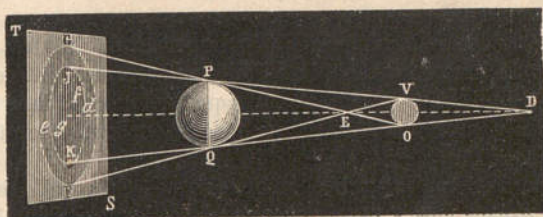


Fig. 248. — Ombre et pénombre d'un corps éclairé par une source lumineuse d'une certaine étendue.

2° Lorsque la source VO (fig. 248) a des dimensions finies, les points situés, au delà de PQ, à l'intérieur du cône JDK formé par les tangentes communes extérieures à VO et à PQ sont dans une obscurité complète. La portion du cône JDK située au delà de PQ constitue encore le cône d'ombre.

D'autre part les points qui se trouvent à l'extérieur du cône GEF formé par les tangentes communes intérieures au corps opaque et à la source reçoivent autant de lumière que si le corps opaque n'existait pas. Mais les points de l'espace situés au delà de PQ et compris entre les deux cônes JDK et GEF ne sont ni dans l'obscurité complète ni en pleine lumière ; ces points reçoivent une quantité de lumière d'autant plus grande qu'ils se trouvent plus près de la surface du cône GEF. On dit que ces points sont dans la *pénombre* et cette région du cône GEF extérieure au cône JDK porte le nom de *cône de pénombre*. La gradation de lumière qui existe dans la pénombre empêche d'ailleurs la délimitation rigoureuse par l'œil de la région où cette pénombre finit.

La forme des cônes d'ombre et de pénombre dépend de la forme de la source et du corps opaque, et varie, toutes choses égales d'ailleurs, avec les dimensions relatives du corps et de la source. Tandis en effet que le cône de pénombre, par suite de la construction géométrique par laquelle on l'obtient, a toujours son sommet entre VO et PQ, le cône d'ombre aura son sommet à l'infini, ou à une dis-

tance finie, soit à droite, soit à gauche de PQ, suivant que les dimensions de la source seront égales, plus petites ou plus grandes que celles du corps opaque.

La forme de l'ombre et de la pénombre observées sur un écran placé au delà de PQ, dépend d'autre part évidemment de la façon dont est disposé cet écran, ainsi que de la forme des cônes d'ombre et de pénombre.

La théorie des ombres permet d'expliquer les différentes formes d'éclipses de lune ou de soleil ; on fait, en outre, une intéressante application de cette théorie, en Physique biologique, dans le diagnostic de la présence d'un corps opaque au sein d'une tumeur translucide.

384. **Images données par la chambre noire.** — On appelle chambre noire un espace clos à parois opaques dans lequel la lumière ne

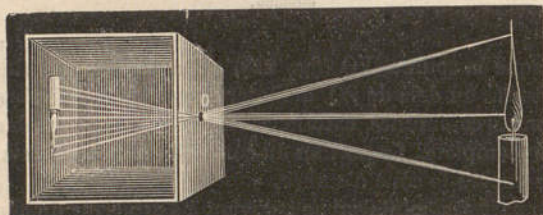


Fig. 249. — Formation de l'image dans la chambre noire.

peut pénétrer que par une petite ouverture *o* (fig. 249) percée dans l'une des parois.

La chambre noire fait former, sur la paroi opposée à l'ouverture, l'image des objets extérieurs, image d'autant plus nette que l'ouverture *o* est plus petite ; ces faits sont une conséquence directe du principe de la propagation rectiligne de la lumière.

Chaque point éclairé de l'objet extérieur envoie, en effet, dans la chambre noire un petit cône de rayons, limité par l'ouverture *o*. Ces rayons, se propageant en ligne droite, iront former sur la paroi opposée une petite tache lumineuse, autour du point où la droite qui passe par le centre de l'ouverture *o* et par le point de l'objet que l'on considère, rencontre cette paroi ; l'ensemble de ces petites taches lumineuses formera une image de l'objet extérieur. Il suffit d'ailleurs de jeter un coup d'œil sur la figure pour voir que cette image sera renversée.

A la vérité, toutes ces petites taches empièteront un peu les unes sur les autres, ce qui nuira à la netteté de l'ensemble; mais cette netteté sera évidemment d'autant plus grande que l'ouverture o sera plus petite. En outre, si la paroi sur laquelle l'image vient se peindre s'éloigne de l'ouverture o , l'empiètement réciproque des petites surfaces éclairées augmente, puisque l'étendue de ces surfaces augmente elle-même; mais comme l'image de l'objet grandit en même temps, la netteté de cette image n'est pas, en somme, sensiblement altérée par le déplacement de la paroi.

Il importe de remarquer encore que l'image lumineuse, formée dans la chambre noire, sur la paroi opposée à l'ouverture, est indépendante de la forme de l'ouverture, pourvu toutefois que cette ouverture soit suffisamment petite.

On a à faire intervenir ce mode de formation des images dans la chambre noire lorsque l'on étudie le mécanisme de la vision et de ses anomalies.

382. Vitesse de propagation de la lumière. — C'est au moyen d'observations astronomiques qu'ont été faites les premières déterminations de la vitesse de propagation de la lumière; ces déterminations datent déjà de plus de deux siècles.

Depuis cette époque, Fizeau, puis Foucault et enfin Cornu, au moyen de dispositions expérimentales extrêmement ingénieuses, ont pu faire les mêmes déterminations sur des distances de propagation (un petit nombre de mètres) que l'on doit qualifier de très petites en considération de la grandeur de la vitesse à mesurer.

Les nombres trouvés par ces diverses méthodes, très différentes entre elles, sont assez voisins les uns des autres. Ceux qui paraissent être les plus exacts, ceux de Cornu, assignent à la vitesse de propagation de la lumière une valeur de 300300 kilomètres par seconde, dans l'air à la pression atmosphérique, avec une erreur probable qui, d'après Cornu, doit être inférieure à 300 kilomètres.

Cette vitesse est du reste variable avec les milieux dans lesquels la lumière se propage. La vitesse de la lumière dans l'eau est les $\frac{3}{4}$ et dans le verre les $\frac{2}{3}$ de la vitesse dans l'air.

CHAPITRE II

RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE

I. — Généralités. Lois de la réflexion.

383. **Changement de direction de la lumière à la surface de séparation de deux milieux.** — Lorsque la lumière rencontre la surface de séparation de deux milieux différents, que nous supposerons homogènes, elle se divise généralement en deux parties.

Une portion est renvoyée dans le premier milieu; on dit qu'elle est *réfléchie*.

Une autre portion pénètre dans le second milieu, si ce milieu est transparent; on dit qu'elle est *réfractée*. Les directions suivant lesquelles se propagent les rayons *réfléchis* et *réfractés* diffèrent généralement de la direction des *rayons incidents*; les deux directions incidente et réfléchie ou incidente et réfractée sont d'ailleurs liées l'une à l'autre par des lois que nous énoncerons plus loin.

384. **Influence de la nature de la surface. Diffusion.** — Lorsque la surface de séparation de deux milieux est bien polie, les faisceaux réfléchis et réfractés correspondant à un faisceau incident quelconque ont toujours une direction et une forme qu'il est facile de déduire des lois que nous établirons bientôt. La réflexion et la réfraction sont alors régulières.

Il n'en est plus ainsi lorsque la surface de séparation des deux milieux est rugueuse. Chaque élément de cette surface se comporte alors comme une véritable source lumineuse et renvoie de la lumière dans toutes les directions, et dans les deux milieux si chacun d'eux est transparent; la proportion de lumière qui pénètre dans chacun de ces milieux dépend d'ailleurs de leur degré de transparence.

On peut se rendre compte de ce phénomène en remarquant que chaque aspérité d'un corps rugueux peut être considérée comme limitée par une infinité de petites surfaces planes orientées dans tous les sens et qui doivent, par suite, d'après les lois de la réflexion et de la réfraction (§§ 383 et 443), réfléchir et réfracter la lumière dans toutes les directions. On dit, dans ce cas, que la lumière est *diffusée*.

La diffusion de la lumière joue un grand rôle dans nos relations avec le monde extérieur. Chaque point de la surface dépolie d'un corps envoyant, en effet, de la lumière dans toutes les directions, notre œil reçoit toujours, quelque position qu'il occupe, des rayons diffusés par les divers points du corps ; celui-ci, bien que non photogène, est dès lors visible de tous les points de l'espace environnant.

Par contre, un corps non photogène et parfaitement poli, est complètement invisible. Notre œil, en effet, placé en face d'un tel corps, ne reçoit de la lumière que s'il se trouve sur le trajet du faisceau régulièrement réfléchi ou réfracté par le corps ; or, même dans ces conditions, et par suite de ce double fait, que, d'une part, notre œil ne peut reconnaître si un rayon a été réfléchi ou réfracté, et que, d'autre part, nous rapportons la sensation perçue à une source située sur la dernière direction rectiligne du rayon exciteur, nous verrons, non pas la surface polie du corps, mais une image plus ou moins déformée de la source éclairante. C'est ainsi que nous ne distinguons pas la surface polie et bien nette d'une glace, tandis que la moindre buée suffit au contraire à rendre cette surface visible.

C'est grâce à la lumière diffusée par les corpuscules en suspension dans l'air que nous pouvons apercevoir le trajet d'un faisceau lumineux dans une pièce obscure, lorsque notre œil n'est pas situé sur la direction du faisceau.

Les phénomènes de diffusion ont été utilisés par Tyndall et Chamberland pour reconnaître l'absence ou la présence de poussières et de germes dans l'air et dans l'eau ; on se sert encore du même phénomène pour établir le diagnostic de certaines lésions oculaires.

383. Lois élémentaires de la réflexion. — La direction du rayon réfléchi est liée à la direction du rayon incident qui lui a donné naissance par les deux lois suivantes :

1° Le rayon réfléchi reste dans le *plan d'incidence* que déterminent le rayon incident et la normale menée par le point d'incidence à la surface de séparation des deux milieux ;

2° L'angle formé par le rayon réfléchi et la normale, ou *angle de réflexion*, est égal à l'angle formé par le rayon incident avec cette même normale, ou *angle d'incidence*.

Ces lois peuvent être vérifiées directement par l'expérience dans les limites d'exactitude compatibles avec la nature de la lumière ; mais on peut aussi les considérer comme démontrées par la vérifi-

cation expérimentale des diverses conséquences que nous déduirons de ces lois dans le cours de ce Chapitre.

La vérification directe des lois de la réflexion peut être faite au moyen de l'appareil de la figure

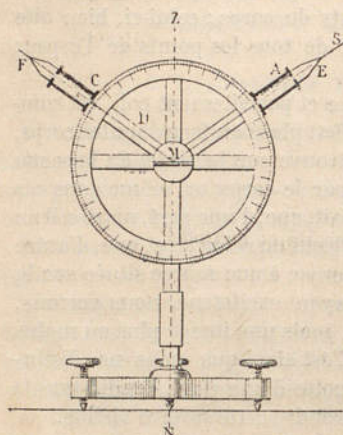


Fig. 250. — Vérification expérimentale des lois de la réflexion.

250, qui se compose d'un cercle vertical gradué, muni en son centre d'un miroir plan horizontal M et sur la circonférence duquel peuvent se déplacer deux alidades terminées par deux tubes A et C; ces tubes sont pourvus de diaphragmes destinés à limiter un mince faisceau lumineux. Si l'on fait tomber sur le miroir M, à travers le tube A, un faisceau lumineux étroit, la direction du faisceau réfléchi est déterminée par la position qu'il faut donner à la seconde alidade pour recevoir ce faisceau à travers le tube C. La graduation du cercle permet de constater que l'angle de ré-

flexion CMZ est égal à l'angle d'incidence AMZ ; l'expérience montre en même temps que les rayons incident et réfléchi sont dans le même plan que la normale MZ à la surface réfléchissante M.

Les lois de la réflexion sont absolument générales et s'appliquent à toute surface réfléchissante quelle que soit sa forme. Le cas où la surface réfléchissante est courbe se ramène d'ailleurs à celui d'une surface plane en remarquant qu'un élément très petit de surface, considéré autour d'un point d'incidence quelconque, se confond avec le plan tangent en ce point à la surface réfléchissante et que la réflexion s'effectue donc comme si elle avait réellement lieu sur ce plan tangent.

386. **Influence de la forme de la surface réfléchissante sur la forme du faisceau réfléchi.** — On conçoit, d'après ce qui précède, que la forme du faisceau réfléchi dépendra, pour un même faisceau incident, de la direction des plans tangents et par suite des normales aux différents points d'incidence, c'est-à-dire, en somme, de la forme de la surface réfléchissante. Dans les surfaces planes, toutes les normales étant parallèles, il en résulte que le degré de

divergence ou de convergence du faisceau incident n'est point modifié par la réflexion. Dans le cas des surfaces courbes au contraire, les normales aux différents points de la surface ne sont plus parallèles et la forme du faisceau réfléchi n'est plus la même que celle du faisceau incident.

Les surfaces courbes sont dites *concaves* ou *convexes* suivant qu'elles présentent leur concavité ou leur convexité vers le côté d'où vient la lumière. La réflexion sur un miroir concave a toujours pour effet d'augmenter la convergence ou de diminuer la divergence des rayons incidents; les miroirs convexes produisent un effet inverse.

Les miroirs concaves et convexes peuvent être *sphériques*, *elliptiques*, *paraboliques*, *cylindriques*, *coniques*, etc., suivant la forme de la surface géométrique à laquelle ils appartiennent. Nous ne nous occuperons ici que de la réflexion de la lumière sur les miroirs plans et sur les miroirs sphériques.

II. — Miroirs plans.

387. **Image d'un point.** — Considérons un miroir plan SR (fig. 251), et un point lumineux D situé en avant de ce miroir. Parmi les rayons que le point D envoie dans toutes les directions, il en est qui rencontrent la surface du miroir; soit DE l'un de ces rayons dont le plan d'incidence coïncide avec le plan de la figure.

D'après les lois de la réflexion (§ 385), le rayon réfléchi correspondant à DE sera situé dans le plan de la figure et aura une direction EH telle que, si EG est la normale au miroir, on ait :

$$\text{angle DEG} = \text{angle HEG}.$$

Du point D, abaissons sur le miroir une perpendiculaire que nous prolongeons jusqu'à sa rencontre en *d* avec le prolongement du rayon réfléchi. Les triangles rectangles DES, *d*ES sont égaux comme ayant le côté SE commun et les angles DES et *d*ES égaux. Par suite $Sd = SD$, c'est-à-dire que le prolongement *Ed* du rayon réfléchi passe par le point *d* symétrique de D par rapport au miroir.

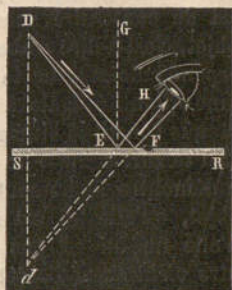


Fig. 251. — Image d'un point lumineux dans un miroir plan.

Le raisonnement qui précède s'appliquant d'ailleurs à tous les rayons qui, issus du point D , sont réfléchis par le miroir, on voit que les prolongements de tous ces rayons réfléchis iront se couper en ce même point d . Dès lors, pour un œil placé sur le trajet des rayons réfléchis, la sensation sera la même que si ces rayons venaient réellement d'un point lumineux situé en d derrière le miroir.

C'est pour cette raison que le point d est appelé *image* du point D ; cette image est d'ailleurs dite *virtuelle* parce qu'elle est formée par la rencontre des prolongements des rayons réfléchis, qu'elle n'existe pas en réalité et qu'elle ne peut être reçue sur un écran.

Si, au lieu de considérer des rayons émanés d'un même point, nous considérons des rayons incidents tels que HE , IF , qui, si le miroir n'existait pas, iraient se couper en un même point d situé derrière le miroir, il est évident que tous ces rayons iront, après réflexion sur le miroir SR , concourir en un point D symétrique de d . Le point D est encore dit l'*image* de d ; cette image est *réelle*, car elle est formée par la rencontre des rayons réfléchis eux-mêmes et peut être reçue sur un écran. Le point d , qui joue dans ce cas le rôle d'objet, est au contraire *virtuel*.

388. Image d'un objet. — Il est facile, d'après ce qui précède, de trouver l'image d'un objet donnée par un miroir plan. Il suffit pour cela de construire successivement l'image de chaque point de l'objet, c'est-à-dire d'abaisser de chacun des points de l'objet des perpendiculaires sur le miroir et de prolonger chacune d'elles d'une quantité égale à elle-même; l'ensemble des points ainsi obtenus constitue l'image de l'objet.

En tenant compte de la construction qui permet de l'obtenir, on démontre facilement que cette image est égale en grandeur à l'objet, qu'elle lui est symétrique par rapport au miroir, mais qu'elle ne lui est pas cependant superposable. L'image est en outre *virtuelle* si l'objet est *réel*, *réelle* si l'objet est *virtuel*.

Dans le cas où l'objet est une droite CD (fig. 252), on en obtient l'image en cherchant, comme nous venons de le dire, les images C' , D' des deux extrémités C et D de l'objet et joignant ces images par une droite.

389. Champs d'un miroir plan. — Il résulte de ce que nous avons dit relativement à l'image d'un point lumineux donnée par un miroir plan que, pour obtenir l'ensemble des rayons réfléchis qui font voir à un œil occupant une position déterminée l'image d'un

point quelconque, il suffit de joindre l'image de ce point aux bords de la pupille; on détermine ainsi une surface conique limitant les

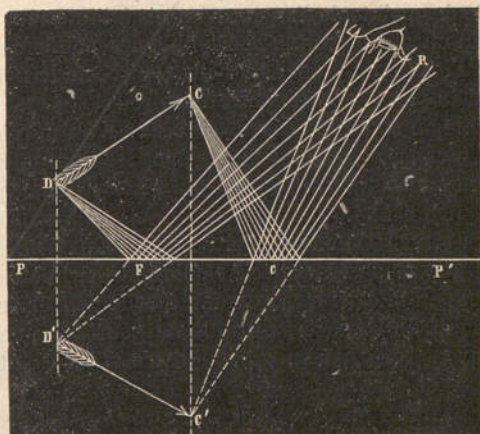


Fig. 252. — Image d'un objet dans un miroir plan.

rayons réfléchis qui seuls pénètrent dans l'œil. On obtient d'ailleurs les rayons incidents qui donnent naissance à ces rayons réfléchis, seuls utiles pour fournir à l'observateur la perception de l'image, en joignant le point lumineux aux divers points de la surface d'intersection du miroir et du cône dont il vient d'être question.

En conséquence, pour qu'un œil placé devant un miroir MM' (fig. 253) puisse recevoir, par réflexion, des rayons lumineux provenant d'un point O situé également en avant du miroir, il faut que les droites qui joignent l'image du point O à la pupille rencontrent la surface du miroir. La condition pour qu'un œil puisse apercevoir, par réflexion sur un miroir, l'image d'un point O occu-

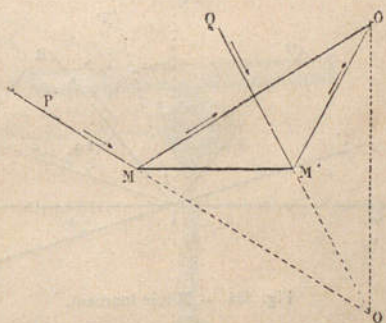


Fig. 253. — Champ de visibilité et champ de vision d'un miroir plan.

pant une position déterminée dans l'espace, est donc que cet œil soit compris dans l'intérieur du cône $PO'Q$ qui a pour sommet l'image O' du point O et dont les génératrices passent par le contour du miroir. L'ensemble des points de l'espace compris à l'intérieur de ce cône, en avant du miroir, constitue l'ensemble des points d'où l'on peut apercevoir l'image du point lumineux O et porte le nom de *champ de visibilité* du point O par rapport au miroir.

On appelle au contraire *champ de vision* d'un miroir plan l'ensemble de tous les points de l'espace dont les images, données par le miroir, peuvent être vues par un œil placé dans une position déterminée O (fig. 233). Le champ de vision est également limité à l'intérieur d'un cône $PO'Q$ qui a pour sommet le point O' symétrique de l'œil O par rapport au miroir et dont les génératrices passent par les bords du miroir. Il est, en effet, facile de voir sur la figure que tout point de l'espace pourra ou ne pourra pas envoyer dans l'œil des rayons réfléchis, suivant qu'il sera situé à l'intérieur ou à l'extérieur de ce cône.

390. **Miroirs tournants.** — Quand un miroir, sur lequel tombe un rayon incident de direction fixe, tourne d'un angle α autour d'un axe perpendiculaire au plan d'incidence, le rayon réfléchi tourne d'un angle double.

Soient en effet un miroir plan MM (fig. 254) et un rayon incident

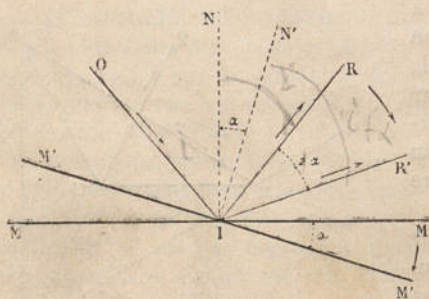


Fig. 254. — Miroir tournant.

OI faisant avec la normale IN au point I un angle $OIN = i$; ce rayon sera réfléchi suivant IR en faisant avec IN un angle $NIR = OIN = i$. Supposons maintenant que le miroir MM tourne d'un angle α autour d'un axe perpendiculaire au plan d'incidence, qui se confond ici avec le plan de la

figure, et soit I la projection de cet axe sur ce plan; le miroir MM viendra en $M'M'$, la normale IN tournera également d'un angle α , et viendra en IN' et l'angle d'incidence du rayon OI sera maintenant $OIN' = i + \alpha$; le nouveau rayon réfléchi prendra dès lors une direction IR' telle que $N'IR' = i + \alpha$.

Mais la figure donne :

$$N'IR' = N'IR + RIR' ;$$

or, on a : $N'IR' = i + \alpha$ et $N'IR = i - \alpha$;

en remplaçant, il vient :

$$i + \alpha = i - \alpha + RIR' ;$$

d'où : $RIR' = 2\alpha$.

Le rayon réfléchi a donc tourné d'un angle $RIR' = 2\alpha$, double de celui dont a tourné le miroir.

Il résulte évidemment de ce qui précède que, pour que deux rayons incidents différents RI et R'I soient réfléchis suivant la même direction IO, lorsque le miroir tourne d'un angle α , il faut que ces deux rayons fassent entre eux un angle R'R égal au double de celui dont a tourné le miroir.

394. **Emploi des miroirs tournants pour la mesure des angles.**

— On fait fréquemment usage du déplacement du rayon lumi-

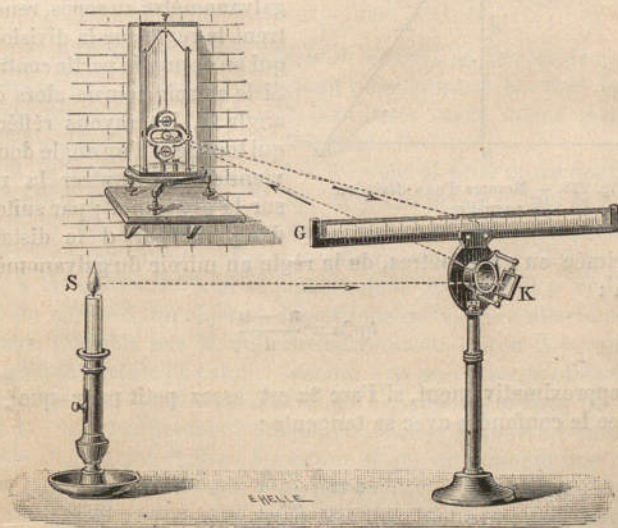


Fig. 255. — Méthode de Poggendorff pour la mesure des déviations angulaires.

neux réfléchi par un miroir tournant pour amplifier de très faibles

déplacements linéaires, par exemple pour rendre visible la dilatation d'une barre solide sous l'influence de la chaleur.

On emploie encore les miroirs tournants, comme Poggendorff l'a fait le premier, pour mesurer de très faibles déviations angulaires. Cette méthode, très commode et très précise, est en particulier utilisée pour la mesure des petites déviations de l'aiguille d'un galvanomètre ou d'un barreau aimanté. Pour effectuer cette mesure, on fixe, sur le fil qui supporte l'aiguille ou le barreau, un petit miroir en face duquel on place un écran; cet écran est percé d'une ouverture qui laisse passer un pinceau de rayons lumineux émis par une bougie S (fig. 255) et réfléchis par un miroir K; à ce même écran est fixée une règle en celluloïd G, divisée en centimètres, que l'on doit orienter parallèlement à la position d'équilibre de la surface

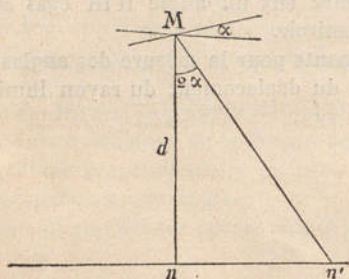


Fig. 256. — Mesures d'une déviation angulaire.

réfléchissante. La position et la hauteur de l'ouverture doivent en outre être réglées de telle sorte que les rayons réfléchis par le miroir M (fig. 256) du galvanomètre au repos, rencontrent la règle sur la division n , qui en occupe la partie centrale. Si le miroir tourne alors d'un angle α , les rayons réfléchis, qui tournent d'un angle double, viennent rencontrer la règle sur la division n' ; par suite, en désignant par d la distance,

$$\tan 2\alpha = \frac{n' - n}{d}$$

ou approximativement, si l'arc 2α est assez petit pour que l'on puisse le confondre avec sa tangente :

$$\alpha = \frac{n' - n}{2d}$$

Lorsqu'on adopte la disposition que nous venons d'indiquer, il est bon de fixer sur l'aiguille du galvanomètre un miroir concave, et de munir l'ouverture de l'écran d'un fil réticulaire vertical dont

on fait former l'image nette sur la règle en donnant à celle-ci une position convenable.

Une autre disposition, qui permet d'atteindre le même but que la précédente, consiste à placer en face d'un miroir plan, fixé à l'aiguille ou au barreau, une règle horizontale au-dessus de laquelle se trouve une lunette dont l'axe optique est perpendiculaire à la direction de la règle. Celle-ci est disposée parallèlement à la position d'équilibre du miroir, de telle sorte que l'on aperçoive dans la lunette, en coïncidence avec le réticule, l'image de la division n située exactement au-dessous de ce réticule. Si le miroir tourne alors d'un angle α , le rayon réfléchi dans la direction de l'axe de la lunette correspond à un rayon incident provenant d'une division n' (dont l'image coïncide actuellement avec le réticule), telle que l'angle des rayons incident et réfléchi soit égal à 2α . L'angle α dont a tourné le miroir est dès lors donné encore par la relation :

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{n' - n}{d}.$$

Le sextant et le cercle répétiteur à réflexion de Borda, deux instruments que les marins emploient pour mesurer en mer la distance angulaire de deux points, sont basés sur le même principe que la méthode de mesure de Poggendorf.

392. **Miroirs parallèles.** — Soit un objet O situé entre deux miroirs plans parallèles M et N (fig. 257). Les divers points de l'objet situés du côté du miroir M envoient sur ce miroir des rayons qui, après réflexion, paraîtront provenir de a_1 , symétrique de O par rapport à ce miroir M . Tout se passera donc comme s'il y avait, en face du miroir N , un objet a_1 , symétrique de O ; par suite, ceux des rayons, réfléchis par M , qui rencontreront le miroir N seront réfléchis à la surface de celui-ci comme s'ils provenaient réellement de l'image a_1 , et donneront une image a_2 symétrique de a_1 par rapport à N et superposable à l'objet O . L'image a_2 jouera à son tour le rôle d'objet par rapport au miroir M qui en donnera une nouvelle image a_3 , symétrique de a_2 par rapport à M , et ainsi de suite. On aura ainsi une double série illimitée d'images dues aux réflexions successives sur les deux miroirs M et N .

D'autre part, les divers points de l'objet tournés du côté de N enverront de même, sur ce miroir, des rayons qui fourniront en b_1 une image symétrique de O . En raisonnant comme ci-dessus, on

verrait que ces rayons, qui tombent d'abord sur le miroir N, donnent encore, par leurs réflexions successives, une double série illimitée d'images, dont les positions alternent d'ailleurs avec celles des images précédentes.

Il est facile de s'assurer que toutes ces images sont alternativement symétriques de l'objet O et superposables à cet objet. Ajoutons que, pour plusieurs raisons, l'éclat de ces images va en s'affaiblissant à mesure qu'elles se forment plus loin.

393. **Images multiples données par les miroirs en verre.** — Les

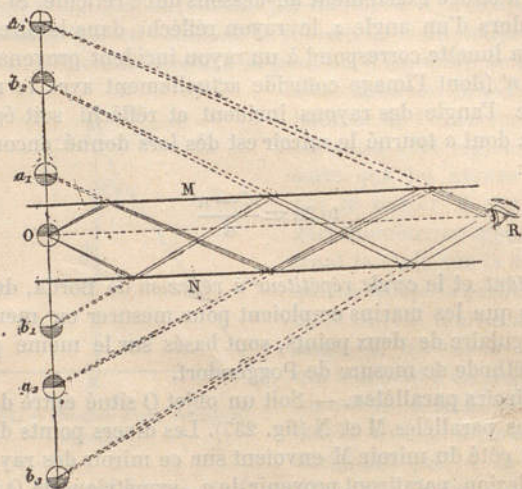


Fig. 257. — Miroirs parallèles.

miroirs constitués par une lame de verre à faces planes et parallèles, dont l'une des faces est étamée ou argentée, présentent en réalité deux surfaces réfléchissantes, les quantités de lumière réfléchies par chacune des faces étant toutefois très inégales entre elles.

Un objet A (fig. 258) placé au devant d'un pareil miroir donne, par réflexion sur la face libre MN, une première image peu brillante *a*, symétrique de A par rapport à MN. Mais la plupart des rayons envoyés par A sur le miroir traversent le verre, viennent se réfléchir sur la face étamée PQ et donnent ainsi en A' une image brillante de A. La majeure partie de ces rayons ressortent

de la lame et arrivent à l'œil de l'observateur, mais une petite portion subit une réflexion sur l'air au niveau de la surface MN, retourne dans le verre, donne, après une nouvelle réflexion sur PQ, une seconde image A'' beaucoup moins intense que la première et ainsi de suite; il se forme donc une série indéfinie d'images dont l'éclat est de plus en plus faible à cause de la perte de lumière subie à chaque réflexion.

Quand on regarde les diverses images dont il vient d'être question, suivant une direction voisine de la normale, ces images se superposent, parce qu'elles sont vues dans la même direction; comme d'ailleurs la seconde d'entre elles est de beaucoup la plus intense, on l'aperçoit généralement seule. On distingue au contraire facilement les images multiples données par un miroir en verre en regardant dans ce miroir sous une incidence oblique.

Un miroir métallique, qui a une seule surface réfléchissante, donne évidemment, dans les mêmes conditions, une image unique de l'objet lumineux.

394. **Miroirs rectangulaires.** — Soit un objet O situé entre deux miroirs rectangulaires M et N (fig. 259). Les rayons, tels que OA, OB, \dots , qui tombent d'abord sur le miroir N , donnent une image O' symétrique de O par rapport à N . Quelques-uns de ces rayons, OB par exemple, rencontrent le miroir M après leur réflexion sur N et donnent une image O_1 symétrique de O' par rapport au miroir M sur lequel la réflexion a lieu actuellement. Il est d'ailleurs facile de voir, sur la figure, que l'image O_1 est située dans l'angle opposé par le sommet à l'angle que font entre eux les miroirs M et N ; il en résulte qu'aucun des rayons qui viennent de se réfléchir sur M et de donner l'image O_1 , ne rencontre de nouveau le miroir N ; par suite aucune nouvelle image ne peut se former de ce fait.

Les rayons qui, partis de O , tombent d'abord sur le miroir M , donnent de même une première image O_1 ; quelques-uns d'entre eux, après cette première réflexion, rencontrent le miroir N et donnent une nouvelle image symétrique de O_1 par rapport à N .

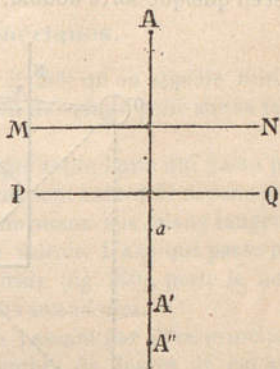


Fig. 258. — Images multiples données par les miroirs en verre.

Il est facile de voir que cette nouvelle image se confond, en grandeur et en position, avec l'image O'_1 et que les rayons qui la forment ne rencontrent plus dès lors, après leur seconde réflexion, le miroir M.

Il ne se forme donc, en somme, que trois images, dont l'une O'_1 est en quelque sorte double. Ces trois images sont d'ailleurs simul-

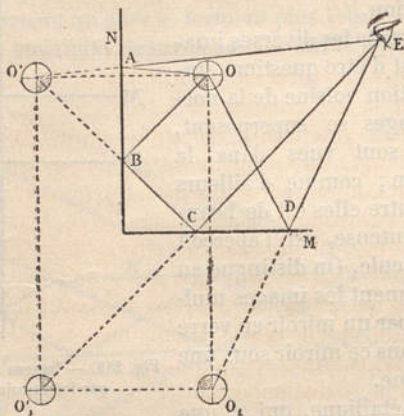


Fig. 259. — Miroirs rectangulaires.

tanément visibles pour un œil qui occupe une position quelconque E dans l'angle des miroirs.

Des considérations analogues aux précédentes montreraient que, lorsque l'angle des miroirs est différent de 90° , il se forme de même deux séries d'images en nombre fini. La dernière image de chaque série est toujours celle qui se forme dans l'angle opposé par le sommet à l'angle des miroirs.

395. **Applications des miroirs plans.** — On fait fréquemment usage, en Physique et en Médecine, de miroirs plans pour renvoyer dans une direction convenable un faisceau de lumière incidente.

Le *porte-lumière* est un miroir plan destiné à faire pénétrer dans une salle, et sous telle direction que l'on désire, un faisceau de lumière solaire ; à cet effet, le miroir est mobile autour de deux axes perpendiculaires entre eux. Si l'on veut maintenir fixe la direction d'un faisceau réfléchi de lumière solaire, malgré le déplacement de l'astre, il est nécessaire de faire constamment varier la direction du

miroir. Ces changements de direction de la surface réfléchissante peuvent être obtenus à l'aide d'un mouvement d'horlogerie convenablement réglé. L'instrument constitue alors un *héliostat*.

On fait, en Médecine, un fréquent usage des miroirs plans pour éclairer les cavités profondes du corps humain et les explorer avec la vue.

III. — Miroirs sphériques.

396. **Définitions.** — Nous avons vu (§ 386) qu'on appelle miroir *sphérique convexe* ou *concave* une portion de sphère polie sur sa face convexe ou sur sa face concave.

On appelle *axe* d'un miroir sphérique toute ligne qui passe par le *centre de courbure* du miroir ; les axes sont autant de rayons prolongés ; ils sont donc respectivement normaux aux plans tangents menés par les points où ils coupent le miroir. L'axe qui passe par le centre de figure A, ou *pôle* du miroir (fig. 260), porte le nom d'*axe principal* ; les autres axes sont dits *secondaires*.

Si l'on coupe un miroir par un plan passant par l'axe principal, la section est un arc de cercle. Le nombre de degrés de cet arc, ou l'angle au centre qu'il sous-tend, est l'*ouverture* du miroir.

Ces définitions s'appliquent aussi bien aux miroirs concaves qu'aux miroirs convexes.

Les miroirs concave et convexe donnent, lorsque leur ouverture est assez petite, des images nettes dont la position et la grandeur dépendent du rayon de courbure du miroir et de la position de l'objet, ainsi que nous allons l'établir dans les paragraphes suivants.

L'étude de la réflexion sur les miroirs concaves et convexes intéresse d'ailleurs à plus d'un titre le médecin. Non seulement, en effet, les miroirs concaves sont d'un emploi courant en clinique (otoscope, ophthalmoscope, etc.), mais encore, c'est en utilisant la cornée et les deux faces du cristallin comme miroirs convexes et concave, que l'on a pu déterminer la courbure de ces dioptries oculaires, leurs distances, le degré de l'astigmatisme cornéen, etc.

397. **Image d'un point situé sur l'axe principal.** — Dans tout ce qui va suivre, nous supposerons toujours que les rayons incidents sont très voisins de l'axe principal ou que le point d'incidence est très rapproché du pôle du miroir. La surface du miroir se confondant avec son plan tangent au pôle dans le voisinage de ce point, nous exprimerons, sur les figures, que les rayons incidents sont très

voisins de l'axe en considérant leurs points d'incidence comme situés sur le plan tangent au pôle du miroir.

Soit d'abord un point lumineux situé sur l'axe principal.

1° *Miroir concave.* — Soient MN (fig. 260) ce miroir, O son

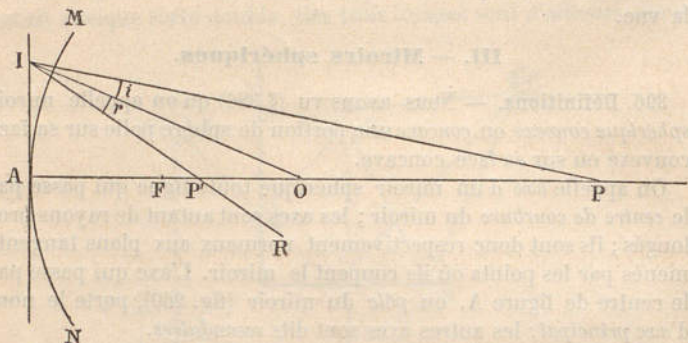


Fig. 260. — Miroir sphérique concave; image d'un point situé sur l'axe principal.

centre de courbure, P le point lumineux et PI l'un quelconque des rayons qui, partis de P, rencontrent la surface du miroir. Le rayon réfléchi fera, avec la normale OI au point I, un angle égal à l'angle d'incidence PIO, et sera donc dirigé suivant la droite IR qui coupe l'axe principal en un point P'; or ce point P' est le même pour tous les rayons issus de P qui tombent sur le miroir.

En effet, dans le triangle PIP', la droite IO, bissectrice de l'angle PIP', partage le côté PP' en deux segments proportionnels aux côtés adjacents. On a donc :

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

Si l'ouverture du miroir est très faible, la distance du point I au point A est toujours très petite par rapport à la distance de ce même point I au centre O du miroir; on peut dès lors admettre que les distances PI et P'I sont respectivement égales à PA et P'A. Par suite, l'égalité précédente peut s'écrire :

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

PA = p, P'A = p', OA = r, et convenons de considérer

toujours comme positives les quantités comptées, à partir du pôle du miroir, dans le sens de la propagation de la lumière réfléchie, comme négatives celles qui sont comptées en sens inverse à partir du même point. L'égalité précédente devient alors :

$$\frac{r-p'}{p-r} = \frac{p'}{p};$$

d'où : $rp - pp' = pp' - rp'$,

ou : $rp' + rp = 2pp'$. (1)

En divisant par $pp'r$, on obtient :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{2}{r}. \quad (2)$$

Si l'on tire des formules (1) ou (2) la valeur de p' , on a :

$$p' = \frac{pr}{2p - r},$$

relation qui montre que la valeur de p' , c'est-à-dire la position du point P' , est indépendante de la position du point I . Par suite, lorsque l'ouverture du miroir est, comme nous l'avons supposé, assez petite, tous les rayons partis d'un point P de l'axe principal vont, après réflexion, se couper en un même point P' de cet axe ; P' est donc l'image du point P .

La position de l'image P' dépend de p et de r , c'est-à-dire du rayon de courbure du miroir et de la position de l'objet P .

La figure montre d'ailleurs que si le point lumineux est en P' , son image se forme en P , et cette conséquence résulte aussi de la symétrie de la formule (2) par rapport à p et à p' . Cette réciprocité de position des points P et P' a fait donner à ces points le nom de *foyers conjugués*.

2° *Miroirs convexes*. — Des considérations analogues aux précédentes permettent d'établir la relation qui existe entre la position d'un point lumineux situé sur l'axe et celle de son image.

Soient, en effet, un rayon incident PI (fig. 261) et le rayon réfléchi correspondant IR , dont le prolongement coupe l'axe en un point P' . La normale OI au point d'incidence étant bissectrice de l'angle PIR extérieur au triangle $P'IP$, on a :

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

En supposant encore que le point I est très voisin de l'axe, on peut écrire :

$$\frac{OP'}{OP} = \frac{P'A}{PA}$$

ou :

$$\frac{OA - P'A}{OA + PA} = \frac{P'A}{PA}$$

Désignons, comme précédemment, par p et p' les distances des points P et P' au pôle A du miroir, par r le rayon de courbure et adoptons la même convention de signes que pour les miroirs

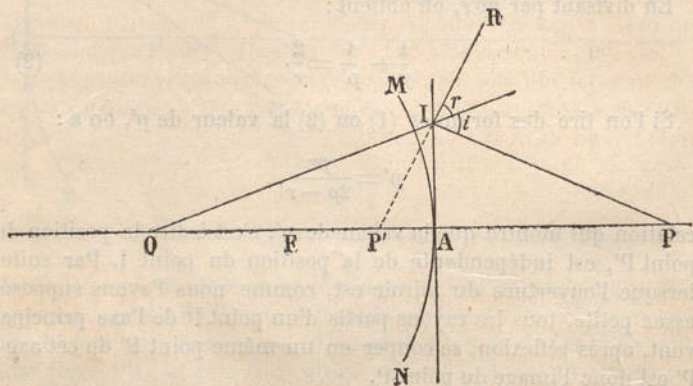


Fig. 261. — Miroir sphérique convexe; image d'un point situé sur l'axe principal.

concaves. On voit, sur la figure, que p' et r sont comptés en sens inverse du sens de la propagation de la lumière réfléchie, et doivent, par suite, être regardés comme négatifs; l'égalité précédente étant d'ailleurs une relation géométrique entre les valeurs absolues, c'est-à-dire positives, de certaines lignes, P'A et OA devront y être remplacés par $-p'$ et $-r$, tandis que PA, qui est positif par suite du sens dans lequel il est compté, devra être remplacé par p . Il viendra donc :

$$\frac{-r + p'}{-r + p} = \frac{-p'}{p};$$

d'où, en chassant les dénominateurs et divisant tous les termes par $pp'r$:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{2}{r}. \quad (3)$$

On voit que, comme pour les miroirs concaves, la valeur de p' , c'est-à-dire la position de P' , est indépendante de la position du point I . Tous les rayons issus de P et réfléchis par le miroir vont donc, après réflexion et par leurs prolongements, passer par un point P' situé derrière la surface du miroir; ce point sera encore l'image *virtuelle* de P . La position de cette image dépend d'ailleurs, comme pour les miroirs concaves, des valeurs de p et de r .

La figure ou la symétrie de la formule (3) en p et p' montrent encore que, réciproquement, lorsque des rayons incidents sont dirigés de telle sorte qu'ils iraient se couper en P' si le miroir n'existait pas, ces rayons, réfléchis par le miroir, se coupent tous en P , qui est alors l'image *réelle* de l'objet *virtuel* P' .

Nous avons dit que, dans le cas des miroirs convexes, le rayon r était négatif; on met parfois le signe de r en évidence dans la formule (3), qui devient alors :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = -\frac{2}{r}. \quad (4)$$

Si donc on fait usage de cette formule (4), r , considéré en lui-même, doit être regardé comme positif, tandis que cette même lettre renferme implicitement le signe — quand on emploie la formule (3) (1).

398. **Foyer principal.** — Parmi les différentes positions que peut occuper l'image d'un point lumineux situé sur l'axe principal, il en est une qui présente une grande importance; c'est celle qui correspond au cas où le point lumineux est à l'infini, c'est-à-dire où les rayons incidents tombent sur le miroir parallèlement à l'axe principal.

(1) Il importe d'insister sur cette remarque que les signes des divers termes de la formule :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{r}$$

sont uniquement réglés par les conventions relatives aux sens des longueurs positives et négatives, conventions qui sont d'ailleurs absolument arbitraires. Par suite, toute formule en $\frac{1}{p}$, $\frac{1}{p'}$ et $\frac{1}{r}$, dans laquelle on affectera chacun de ces termes d'un signe quelconque, peut également s'appliquer aux miroirs convexes ou aux miroirs concaves; il suffit de l'interpréter dans chaque cas par rapport aux conventions auxquelles les signes adoptés correspondent.

Il suffit, pour trouver la valeur de p' correspondant à ce cas particulier, de faire $p = \infty$ dans les formules (2) et (3); il vient alors :

$$\frac{1}{p'} = \frac{2}{r}, \quad \text{ou} \quad p' = \frac{r}{2}. \quad (5)$$

On représente par f cette valeur spéciale FA (fig. 262 et 263) de p' et on la désigne sous le nom de *distance focale principale*; le point F est dit le *foyer principal* du miroir. Ce foyer est situé, d'après la relation (5), à égale distance entre le centre de courbure et le pôle

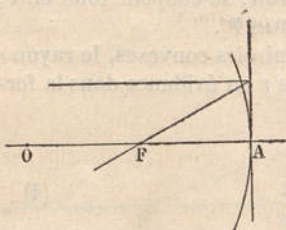


Fig. 262. — Miroir concave; foyer principal.

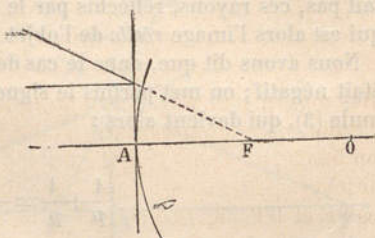


Fig. 263. — Miroir convexe; foyer principal.

du miroir. Il est par suite réel, et la distance f est positive, dans le cas des miroirs concaves; il est virtuel, et f est négatif, dans le cas des miroirs convexes.

Le *foyer principal* est donc le point de concours, réel ou virtuel suivant que le miroir est concave ou convexe, des rayons réfléchis provenant de rayons incidents parallèles à l'axe principal.

Réciproquement, tous les rayons issus du foyer principal, lorsque ce foyer est réel (miroirs concaves), ou dont les prolongements se coupent en ce foyer, lorsque ce même foyer est virtuel (miroirs convexes), sont, après réflexion, parallèles à l'axe principal.

399. **Formules des miroirs.** — Si l'on remplace r par sa valeur $2f$ dans les formules (2) et (3), il vient :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}, \quad (1)$$

relation qui s'applique aux miroirs concaves et convexes, pourvu que l'on tienne compte des conventions de signes indiquées ci-dessus.

Il est commode, pour la discussion, de mettre en évidence le signe de f . Il vient alors, pour les miroirs concaves :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}, \quad (\text{II})$$

pour les miroirs convexes :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f}, \quad (\text{II}')$$

f représentant la valeur absolue de la distance focale principale.

Ces formules peuvent aussi se mettre sous la forme :

$$\frac{f}{p} + \frac{f}{p'} = 1, \quad (\text{III}) \quad \frac{f}{p} + \frac{f}{p'} = -1; \quad (\text{III}')$$

elles sont quelquefois alors dites *transformées*.

Enfin, on compte souvent les distances du point lumineux et de son image, non plus à partir du sommet du miroir, mais à partir du foyer principal. Si l'on désigne par q et q' ces nouvelles distances PF et P'F (fig. 260 et 261) et qu'on les compte positivement, à partir de F, dans le sens de la propagation de la lumière réfléchie, et négativement en sens inverse, la relation $\frac{OP'}{OP} = \frac{P'A}{PA}$ devient, dans le cas des miroirs concaves (fig. 260) :

$$\frac{f - q'}{q - f} = \frac{f + q'}{f + q},$$

dans celui des miroirs convexes (fig. 261), en regardant f comme renfermant implicitement le signe $-$, on a de même :

$$\frac{-f + q'}{-f + q} = \frac{-f - q'}{q + f}.$$

En chassant les dénominateurs, il vient, dans les deux cas :

$$qq' = f^2, \quad (\text{IV})$$

formule *simplifiée* qui a été indiquée par Newton et qui est très commode pour la discussion.

400. **Image d'un point situé sur un axe secondaire.** — Au point de vue des considérations géométriques par lesquelles nous avons établi la formule des miroirs, rien ne distingue un axe secondaire quelconque de l'axe principal. Par suite, les formules établies plus

haut, et relatives aux positions correspondantes d'un point lumineux et de son image, s'appliquent au cas où le point lumineux est situé sur un axe secondaire quelconque; mais, comme dans le cas de l'axe principal, ces formules et leurs conséquences ne sont évidemment exactes que pour des rayons peu inclinés sur l'axe secondaire considéré.

401. Plan focal principal. — Il résulte de ce que nous venons de dire que les divers axes secondaires d'un même miroir ont chacun leur foyer principal à égale distance du miroir et de son centre de courbure; l'ensemble de ces foyers principaux constitue donc une petite calotte sphérique concentrique au miroir et ayant pour pôle le foyer principal F de l'axe principal. Si le miroir a une faible ouverture, les axes secondaires seront tous peu inclinés sur l'axe principal et la calotte sphérique sera assez petite pour qu'on puisse la confondre avec le plan tangent en son pôle F . Ce plan porte le nom de *plan focal principal* ou simplement de *plan focal*.

Le foyer principal d'un axe secondaire est par suite le point où cet axe rencontre le plan focal principal.

Le plan focal jouit de importantes propriétés suivantes, qui résultent immédiatement de ce qui précède :

1° Tous les rayons incidents parallèles à un axe secondaire vont, après réflexion, passer eux-mêmes (miroirs concaves), ou par leurs prolongements (miroirs convexes), au point où cet axe secondaire perce le plan focal, car ce point est précisément le foyer principal de l'axe secondaire;

2° Réciproquement, tous les rayons issus de l'un des points du plan focal, lorsqu'il est réel, ou qui iraient se couper en l'un de ces points, lorsque le plan focal est virtuel, sont, après réflexion, parallèles à l'axe secondaire passant par le point considéré, puisque le point considéré du plan focal est le foyer principal de l'axe secondaire qui passe par ce point.

402. Construction géométrique du rayon réfléchi correspondant à un rayon incident quelconque. — Les propriétés du plan focal permettent de trouver facilement la direction du rayon réfléchi correspondant à un rayon incident quelconque PI (fig. 264 et 265). En effet, menons l'axe secondaire Cf qui passe par le point d'intersection f du rayon incident (fig. 264) ou de son prolongement (fig. 265), suivant que le miroir est concave (fig. 264) ou convexe (fig. 265), avec le plan focal principal. D'après les propriétés de ce plan focal, tout rayon dont la direction passe par f se réfléchit parallèlement à Cf ; le

rayon réfléchi correspondant à PI aura donc la direction IP' parallèle à Cf .

On peut encore mener l'axe secondaire Cf' parallèle au rayon

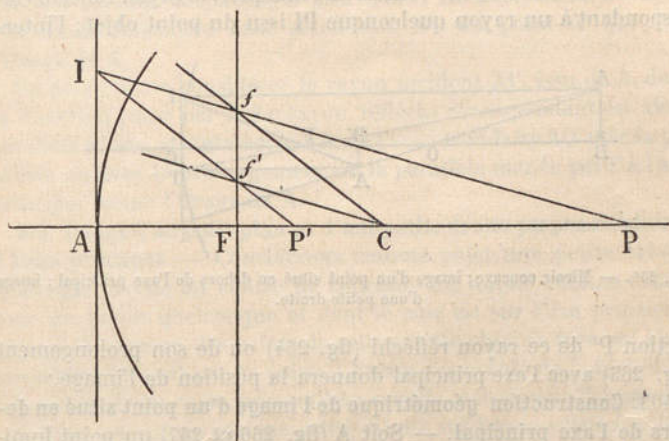


Fig. 264. — Miroir concave; construction du rayon réfléchi correspondant à un rayon incident quelconque.

incident et considérer ce rayon comme faisant partie d'un faisceau de rayons parallèles à l'axe secondaire Cf' ; on sait que les direc-

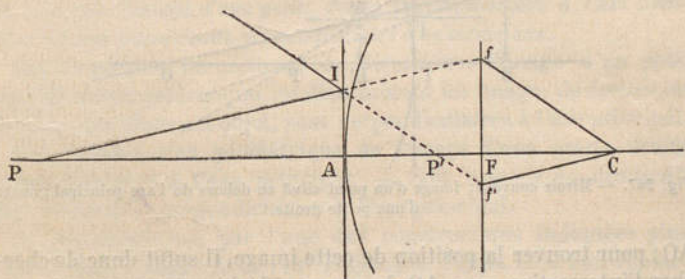


Fig. 265. — Miroir convexe; construction du rayon réfléchi correspondant à un rayon incident quelconque.

tions de tous les rayons réfléchis passeront par le foyer principal f' de cet axe secondaire. La direction du rayon réfléchi correspondant au rayon incident PI s'obtiendra donc en joignant I à f' .

Ces constructions permettent de déterminer géométriquement l'image d'un point P (fig. 264 et fig. 265) situé sur l'axe principal; cette image devant également se trouver sur cet axe, il suffira de construire, comme nous venons de l'indiquer, le rayon réfléchi correspondant à un rayon quelconque PI issu du point objet; l'inter-

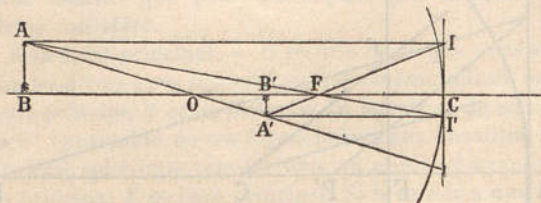


Fig. 266. — Miroir concave; image d'un point situé en dehors de l'axe principal; image d'une petite droite.

section P' de ce rayon réfléchi (fig. 264) ou de son prolongement (fig. 265) avec l'axe principal donnera la position de l'image.

403. **Construction géométrique de l'image d'un point situé en dehors de l'axe principal.** — Soit A (fig. 266 et 267) un point lumineux situé sur un axe secondaire AO peu incliné sur l'axe principal. Nous savons déjà (§ 400) que l'image du point A se trouvera sur l'axe

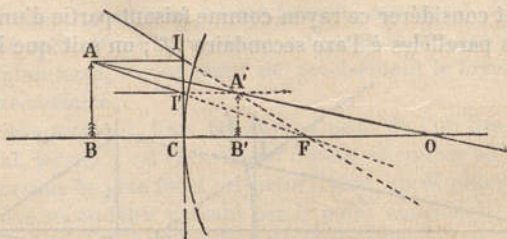


Fig. 267. — Miroir convexe; image d'un point situé en dehors de l'axe principal; image d'une petite droite.

AO ; pour trouver la position de cette image, il suffit donc de chercher l'intersection avec AO du rayon réfléchi qui correspond à un rayon quelconque parti de A , rayon réfléchi dont la direction est donnée par la construction précédente.

Toutefois, au lieu d'un rayon incident quelconque, il est préférable de choisir l'un de ceux dont le rayon réfléchi correspondant est plus facile à déterminer.

Parmi les rayons issus de A, considérons le rayon AI qui est parallèle à l'axe principal; le rayon réfléchi correspondant passera lui-même (miroir concave, fig. 266) ou par son prolongement (miroir convexe, fig. 267) au foyer principal F. La direction de ce rayon réfléchi IF rencontre l'axe secondaire AO au point A' qui sera l'image de A.

On peut encore considérer le rayon incident AI', issu de A, dont la direction passe par F. Le rayon réfléchi correspondant est alors parallèle à l'axe, et l'intersection A' de l'axe secondaire AO avec la parallèle ou avec le prolongement de la parallèle menée par I' à l'axe principal donne l'image de A.

404. Image d'un petit plan et d'une petite droite perpendiculaires à l'axe principal. — Considérons comme objet une petite calotte sphérique décrite du centre de courbure du miroir comme centre avec un rayon quelconque et dont le pôle est sur l'axe principal; l'image de chacun des points de cette calotte-objet se fera sur l'axe secondaire passant par ce point. Chacun des points de l'objet étant à la même distance du miroir, il en sera de même pour l'image qui sera donc constituée par une petite calotte sphérique ayant son pôle sur l'axe principal. Si ces calottes sont suffisamment petites, on peut les confondre avec les plans tangents à leurs pôles et dire que *l'image d'un petit plan perpendiculaire à l'axe principal est un autre plan perpendiculaire à ce même axe.* En répétant le même raisonnement pour un arc de cercle que l'on confondrait avec sa tangente, on voit que *l'image d'une petite droite perpendiculaire à l'axe principal est une autre droite perpendiculaire à ce même axe.*

Ces remarques permettront de déterminer l'image d'un petit objet de forme quelconque, en déterminant les images de droites ou de plans qui, dans cet objet, sont perpendiculaires à l'axe principal.

405. Construction géométrique de l'image d'une petite droite perpendiculaire à l'axe principal. — Soit une petite droite AB (fig. 266 et 267) perpendiculaire à l'axe principal.

Si l'on détermine, par l'une des constructions indiquées plus haut (§ 403), l'image A' de l'extrémité A de l'objet et si l'on remarque que l'image de AB doit être une droite perpendiculaire à l'axe principal, il suffit de mener A'B' perpendiculaire à cet axe pour avoir l'image de AB.

Les relations de position de l'image et de l'objet sont évidemment données par les formules que nous avons établies à propos d'un point lumineux et de son image.

406. Relations de grandeur entre un objet et son image. — Les deux triangles rectangles FAB, F'I'C (fig. 266 et 267), qui sont semblables comme ayant tous leurs angles égaux, donnent :

$$\frac{I'C}{AB} = \frac{CF}{FB}. \quad (1)$$

Or I'C est égal à A'B' puisque A'I' est parallèle à l'axe; si donc l'on désigne par y' la grandeur A'B' de l'image et par y celle de l'objet AB, il vient :

$$\frac{y'}{y} = \frac{CF}{FB} = \pm \frac{f}{q}, \quad (\text{V et V'})$$

suivant que le miroir est concave (fig. 266) ou convexe (fig. 267), mais $\frac{f}{q} = \frac{q'}{f}$, car $qq' = f^2$ (§ 399); on peut donc écrire aussi :

$$\frac{y'}{y} = \pm \frac{q'}{f}. \quad (\text{VI et VI'})$$

On peut exprimer encore le rapport $\frac{y'}{y}$ en fonction de p et de p' .

Remarquons, en effet, que, dans le cas des miroirs concaves (fig. 266), on a :

$$\frac{CF}{FB} = \frac{CF}{CB - CF},$$

La formule (1) devient donc :

$$\frac{y'}{y} = \frac{f}{p - f}. \quad (\text{VII})$$

En remarquant que la formule

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

conduit à : $p' = \frac{pf}{p - f}$, d'où : $\frac{f}{p - f} = \frac{p'}{p}$,

on a cette autre expression du rapport de grandeur de l'image à l'objet :

$$\frac{y'}{y} = \frac{p'}{p}. \quad (\text{VIII})$$

Dans le cas des miroirs convexes, la figure 267 donne :

$$\frac{CF}{FB} = \frac{CF}{CB + CF}$$

La formule (1) devient alors, en tenant compte des conventions de signes adoptées :

$$\frac{y'}{y} = \frac{-f}{p - f}, \quad (\text{VII})$$

ou, en mettant le signe de f en évidence :

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

Comme pour les miroirs concaves, la relation qui donne le rapport des dimensions de l'image et de l'objet peut encore se mettre sous la forme :

$$\frac{y'}{y} = \frac{-p'}{p}. \quad (\text{VIII}')^{(1)}$$

407. Discussion des formules des miroirs. — La discussion des formules (II) et (II'), (VIII) et (VIII') (pages 555, 560 et 561) fait connaître la position et la grandeur de l'image correspondant à une position quelconque de l'objet. Il suffit pour cela de tirer la valeur de p' et de y' de ces formules et de donner successivement à p toutes les valeurs comprises entre $+\infty$ et $-\infty$. D'après les conventions faites sur les signes de p et de p' , l'objet et l'image seront réels ou virtuels suivant que p et p' seront positifs ou négatifs ; il résultera en outre de la discussion que l'image sera droite ou renversée par rapport à l'objet, suivant que p et p' seront de signes contraires ou de même signe.

(1) La différence de signe des formules (V'), (VI'), (VII) et (VIII') relatives aux miroirs convexes et des formules (V), (VI), (VII) et (VIII) relatives aux miroirs concaves provient de ce que nous n'avons pas fait de convention de signes pour exprimer la réalité ou la virtualité de l'image et de l'objet, et de ce que, dans le cas choisi (fig. 266) pour établir les formules des miroirs concaves, l'objet et l'image sont réels et par suite de même signe, tandis que, dans le cas choisi pour les miroirs convexes (fig. 267), l'objet est réel et l'image virtuelle; l'objet et l'image sont par suite alors de signes contraires.

Nous considérerons successivement les miroirs concaves et les miroirs convexes.

Miroirs concaves. La formule

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f} \quad \text{donne} \quad p' = \frac{pf}{p-f},$$

relation qui peut se mettre sous la forme :

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

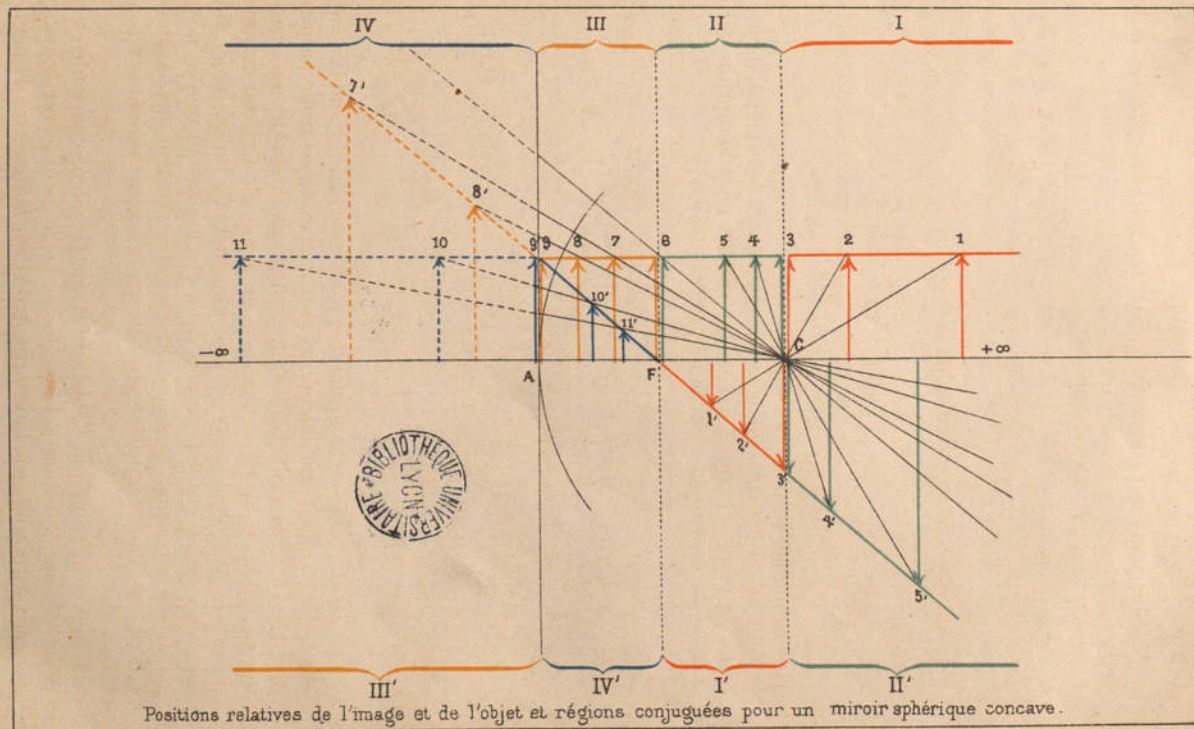
plus commode pour la discussion.

Nous avons consigné dans le tableau suivant les valeurs de p' et celles de l'image I pour les diverses valeurs de p comprises entre $+\infty$ et $-\infty$; l'objet est désigné par la lettre O :

$p = +\infty$	$p' = f$	I très petite,	Réelle,	Renversée.
$+\infty > p > 2f$	$f < p' < 2f$	$I < O$	—	—
$p = 2f$	$p' = 2f$	$I = O$	—	—
$f < p < 2f$	$+\infty > p' > 2f$	$I > O$	—	—
$p = f$	$p' = \pm \infty$	I infinim ^t grande.		
$0 < p < f$	$-\infty < p' < 0$	$I > O$	Virtuelle,	Droite.
$p = 0$	$p' = 0$	$I = O$		—
$-\infty < p < 0$	$0 < p' < f$	$I < O$	Réelle,	—
$p = -\infty$	$p' = f$	I très petite,	—	—

Les résultats de cette discussion sont représentés sur la planche I, dans laquelle un objet de grandeur constante (droite perpendiculaire à l'axe principal) occupe successivement diverses positions 1, 2, 3... 8, 9, 10... entre $+\infty$ en avant d'un miroir concave de rayon AC (objet réel) et $-\infty$ en arrière du miroir (objet virtuel). L'image a été déterminée dans chaque cas au moyen de la construction connue, et ses positions correspondant aux positions 1, 2, 3... de l'objet ont été marquées par les mêmes numéros accentués, 1', 2', 3'...

Il faut remarquer que, l'objet ayant une grandeur constante et se déplaçant parallèlement à lui-même de façon à conserver toujours ses deux extrémités sur l'axe principal et sur la ligne 1...11 paral-



PARIS - J.B. BAILLIÈRE ET FILS.

lèle à cet axe, l'image sera toujours comprise entre l'axe principal et la ligne 7'....3' qui est la direction du rayon réfléchi correspondant à la direction 1....11 du rayon incident. Cette ligne 7'....3', qui limite la grandeur de l'image, a reçu de Gariel le nom de *caractéristique* de l'image par rapport au miroir.

On peut dès lors schématiser ainsi qu'il suit les résultats de la discussion.

Tout d'abord, la figure montre que l'image et l'objet se déplacent toujours en sens inverse l'un de l'autre.

En outre, divisons l'espace total, compris entre $+\infty$ et $-\infty$, en quatre régions savoir :

Depuis $+\infty$ jusqu'au centre de courbure C ;

Depuis le centre de courbure C jusqu'au foyer principal F ;

Depuis le foyer principal F jusqu'au miroir A ;

Depuis le miroir A jusqu'à $-\infty$.

La figure montre que, lorsque l'objet se déplace tout en restant dans l'une de ces régions, l'image se déplace en restant toujours dans une autre de ces mêmes régions. Pour mettre mieux ce fait en évidence sur la planche I, l'objet a été représenté par des lignes rouges, vertes, jaunes et bleues suivant la région dans laquelle il est situé et l'image a été, dans chacune de ses positions, colorée comme l'objet auquel elle correspond. Les objets et les images qui occupent la position limite de deux régions successives ont d'ailleurs été représentés par deux traits voisins dont les couleurs sont celles de chacune des régions contiguës ; tel est le cas de l'objet 3 et de son image 3'.

Les diverses portions de la droite 1....11 qui limite l'objet ont en outre été tracées en traits dont la couleur est celle de l'objet correspondant, et il en est de même pour la caractéristique 3'....7' qui limite l'image.

Celle des régions, définies plus haut, dans lesquelles se trouvent l'objet d'une part, l'image correspondante d'autre part, sont des régions *conjuguées*. Ces régions conjuguées ont été indiquées, sur la planche I, par des accolades de même couleur et par les mêmes numéros, en haut de la figure pour l'objet, en bas de la figure et avec accent pour l'image. Les régions conjuguées sont donc I et I', II et II', III et III', IV et IV'.

L'objet et l'image ont d'ailleurs été représentés par des traits continus ou discontinus suivant qu'ils sont réels ou virtuels.

On peut vérifier expérimentalement les divers résultats consi-

gnés dans le tableau ci-dessus et représentés sur la figure, en prenant comme objet lumineux réel, une bougie, et comme objet lumineux virtuel, l'image d'une bougie donnée par une lentille dans des conditions telles que cette image se forme derrière la surface du miroir. L'image fournie par la réflexion sur le miroir peut être reçue sur un écran lorsqu'elle est réelle; on ne peut que la voir derrière la surface réfléchissante lorsqu'elle est virtuelle.

Miroirs convexes. Les formules à discuter dans le cas des miroirs convexes sont :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f} \quad \text{et} \quad \frac{y'}{y} = -\frac{p'}{p},$$

d'où l'on tire :

$$p' = \frac{-pf}{p+f} \quad \text{ou} \quad p' = \frac{-f}{1 + \frac{f}{p}} \quad \text{et} \quad y' = -\frac{p'}{p}y.$$

Les résultats de la discussion sont consignés dans le tableau suivant :

	$p = +\infty$	$p' = -f$	I très petite,	Virtuelle,	Droite.
$+\infty > p > 0$		$-f < p' < 0$	$I < 0$	—	—
$p = 0$		$p' = 0$	$I = 0$	—	—
$-f < p < 0$	$+\infty > p' > 0$		$I > 0$	Réelle,	—
$p = -f$		$p' = \pm \infty$	I infini ^m gr.		
$-2f < p < -f$	$-\infty < p' < -2f$		$I > 0$	Virtuelle,	Renversée.
$p = -2f$	$p' = -2f$		$I = 0$	—	—
$-\infty < p < -2f$	$-2f < p' < -f$		$I < 0$	—	—
$p = -\infty$	$p' = -f$		I très petite,	—	—

La planche I, construite pour le cas des miroirs concaves, peut représenter, sans subir aucun changement, les positions relatives de l'image et de l'objet dans le cas où la réflexion s'effectue sur un miroir convexe. Il suffit pour cela de supposer que c'est la face convexe du miroir qui est la surface réfléchissante et que la lumière se propage maintenant de gauche à droite. En conséquence, les objets et les images qui, sur cette figure, sont marqués par des traits interrompus sont alors des objets et des images réels, tandis

que ceux qui sont représentés par des traits continus sont maintenant des objets et des images virtuels.

Cette planche I, montre immédiatement que, comme pour les miroirs concaves, l'image et l'objet se déplacent toujours en sens inverse l'un de l'autre.

Comme pour les miroirs concaves, en divisant la longueur totale de l'axe principal, supposé indéfini dans les deux sens, en quatre régions, l'objet et l'image correspondants se trouveront encore dans les régions qui portent, en haut et en bas de la figure, le même numéro ou des accolades de même couleur.

La planche I nous montre, par exemple, que si l'objet est entre F et C, dans la région marquée II, l'image correspondante est située au delà de C en allant vers la droite, dans la région marquée II' ; de plus, la même figure nous apprend immédiatement que l'objet est virtuel, et que l'image, virtuelle aussi, est plus grande que l'objet et renversée par rapport à celui-ci.

408. **Plan principal et plan antiprincipal.** — Que le miroir soit concave ou convexe, il résulte de ce qui précède que :

1° Lorsque l'objet coïncide avec la surface réfléchissante, l'image, égale en grandeur à l'objet et droite par rapport à celui-ci, coïncide avec la même surface et par suite avec l'objet ; le plan tangent au sommet du miroir a été, pour cette raison, appelé *plan principal*.

2° Lorsque l'objet est situé au centre de courbure du miroir, l'image correspondante, égale encore en grandeur à l'objet, mais renversée par rapport à celui-ci, est située aussi au centre de courbure ; le plan, perpendiculaire à l'axe principal, qui passe par le centre de courbure du miroir a reçu, en raison de ce fait, le nom de *plan antiprincipal*.

Nous verrons plus loin que dans tout système réfringent centré quel qu'il soit, dioptré simple, lentille, dioptré composé, œil humain, etc., il existe de même deux positions de l'objet pour lesquelles l'image correspondante, égale en grandeur à l'objet, est droite ou renversée par rapport à celui-ci ; ces positions correspondantes de l'image et de l'objet ne coïncident pas d'ailleurs, en général, si bien qu'il existera alors deux plans principaux et deux plans antiprincipaux dont la considération est très importante pour l'étude de la réfraction à travers un système centré et en particulier à travers l'œil humain.

409. **Détermination expérimentale du rayon de courbure d'un**

miroir sphérique. — Les procédés qui permettent de faire cette détermination sont fort nombreux; nous ne citerons ici que les principaux.

Miroirs concaves. 1° On reçoit sur le miroir un faisceau de rayons parallèles, des rayons solaires par exemple, et l'on cherche, à l'aide d'un petit écran, le point de concours des rayons réfléchis, c'est-à-dire l'endroit où la tache lumineuse qui se peint sur l'écran est la plus petite. La distance de l'écran au miroir fait alors connaître approximativement la distance focale principale; il suffit de doubler cette distance pour avoir le rayon de courbure;

2° On place devant le miroir, à une distance connue p , un objet lumineux et l'on reçoit son image sur un écran que l'on déplace jusqu'à ce que cette image présente le maximum de netteté; on mesure alors la distance p' de l'écran au miroir. Connaissant p et p' , il est facile de calculer r ; en effet, de la formule :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{2}{r}, \quad \text{on tire : } r = \frac{2pp'}{p+p'}$$

expression qui donne r en fonction de p et de p' . On évite tout calcul en cherchant par tâtonnements la position qu'il faut donner à l'objet pour que $p = p'$; l'objet est alors au centre de courbure et r est donc égal à p ;

3° On place devant le miroir un objet lumineux de grandeur y et l'on mesure, par un procédé quelconque, la grandeur y' de l'image; connaissant alors y et y' , on peut facilement calculer f et par suite r . On a en effet :

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

d'où l'on tire : $f = p \frac{y'}{y+y'}$,

et par suite : $r = \frac{2py'}{y+y'}$.

C'est ce dernier procédé que l'on emploie lorsqu'on détermine le rayon de courbure de la face postérieure du cristallin; la grandeur de y' est alors mesurée avec un instrument spécial qui est dû à Helmholtz, et qui porte le nom d'*ophthalmomètre*; nous les indiquons plus loin (§ 418) le principe.

Miroirs convexes. Le procédé à la fois le plus précis et le plus

pratique consiste à placer devant le miroir un objet lumineux de grandeur connue y et à mesurer la grandeur y' de l'image que donne le miroir. Pour mesurer l'image virtuelle y' , on a d'ailleurs recours à l'ophtalmomètre d'Helmholtz. Connaissant y' et y il est facile de calculer f et par suite r ; on a en effet, dans le cas des miroirs convexes (§ 406) :

$$\frac{y'}{y} = \frac{f}{p+f},$$

d'où : $f = \frac{py'}{y-y'}$, ou $r = \frac{2py'}{y-y'}$.

On trouve ainsi la valeur absolue du rayon ; cette valeur doit être affectée du signe $-$, si l'on veut indiquer que le miroir est convexe.

Lorsqu'on ne veut pas obtenir la mesure de r avec une approxi-

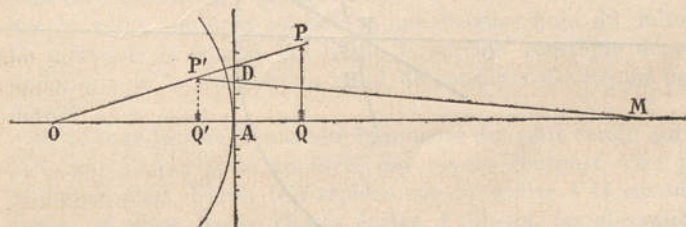


Fig. 268. — Détermination du rayon de courbure d'un miroir convexe.

mation aussi grande que celle que permet d'atteindre l'ophtalmomètre, on opère de la manière suivante. On colle sur la surface du miroir convexe, et suivant le grand cercle horizontal représenté sur la figure 268, une bande de papier divisée en centimètres et demi-centimètres, puis l'on dispose à une distance p , en avant du miroir, un objet vertical de largeur connue $PQ = y$. En se plaçant alors en M , à une assez grande distance sur l'axe principal du miroir convexe, on note le nombre des divisions de la graduation qui paraissent comprises entre les bords de l'image virtuelle $P'Q'$, ce qui fait connaître la grandeur de l'intervalle AD ; car, si la distance AM est de quelques mètres, on peut admettre que les deux droites $Q'M$ et $P'M$ sont parallèles et que par suite $AD = P'Q'$. C'est la valeur

de AD que l'on porte alors à la place de y' dans l'expression du rayon de courbure r .

410. **Aberrations de sphéricité. Caustiques.** — Nous avons supposé, dans tout ce qui précède, que les miroirs employés avaient une très petite ouverture et nous avons vu que, dans ces conditions, on pouvait admettre que des rayons incidents *homocentriques*, c'est-à-dire dont les directions se coupent en un même point, formaient encore un faisceau homocentrique après réflexion.

Mais, lorsque l'ouverture du miroir n'est pas très petite, des rayons issus d'un point ne se coupent pas, après réflexion, en un

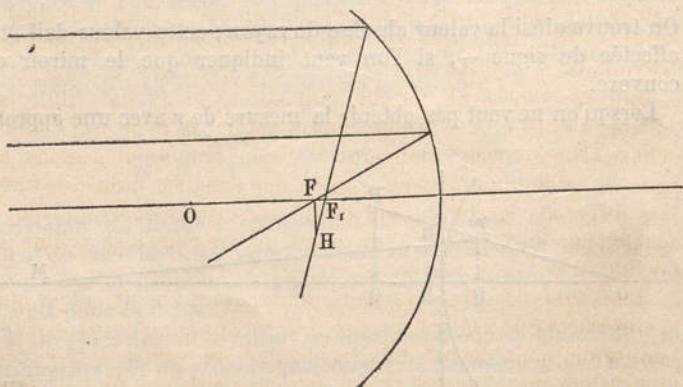


Fig. 269. — Aberrations de sphéricité dans les miroirs sphériques.

point unique, sauf dans quelques cas particuliers dont nous parlerons plus loin. Le calcul et l'expérience montrent, par exemple, que si l'on reçoit sur un miroir sphérique de grande ouverture un faisceau de rayons incidents parallèles à l'axe principal, les rayons *centraux*, c'est-à-dire ceux dont le point d'incidence est voisin du pôle du miroir, coupent l'axe, après réflexion, en un point F (fig. 269), *foyer des rayons centraux*, qui est, dans le cas considéré, situé plus près du centre de courbure que le foyer F_1 des *rayons marginaux* ou rayons dont le point d'incidence est voisin du bord du miroir. Ce défaut d'homocentricité des rayons réfléchis constitue l'*aberration de sphéricité*.

La distance FF_1 porte le nom d'*aberration longitudinale de sphéricité*. En chacun des points de la droite FF_1 vont concourir, après

réflexion, tous les rayons dont le point d'incidence est à une distance déterminée et constante du pôle du miroir; il y a donc sur cette droite concentration de lumière. D'autre part, dans un plan quelconque passant par l'axe, chaque rayon réfléchi coupe le rayon réfléchi infiniment voisin en un point situé en dehors de l'axe; le lieu de ces points d'intersection, pour les rayons contenus dans un même plan passant par l'axe, forme une courbe appelée *caustique par réflexion* et l'ensemble de ces courbes constitue une *surface caustique*.

La distance FH, comptée sur la perpendiculaire menée par F à l'axe principal, a reçu le nom d'*aberration latérale de sphéricité*; un écran placé en F, perpendiculairement à l'axe principal du miroir, serait illuminé sur toute la surface du petit cercle de rayon FH.

Les *aberrations* FF₁ et FH, que nous venons de définir, sont du reste dites *principales* lorsque le point lumineux est à l'infini; elles existent encore, mais présentent des valeurs différentes, lorsque le point lumineux est situé à une distance finie du miroir. La forme de la courbe qui limite la surface caustique dépend également de la position du point de concours des rayons incidents.

Dans tous les cas, l'intensité lumineuse du petit cercle qui se peint sur l'écran placé au foyer des rayons centraux n'est pas uniforme, mais décroît très rapidement du centre à la circonférence; en outre, toutes choses égales d'ailleurs, les aberrations diminuent avec l'ouverture du miroir. On comprend dès lors que des miroirs de faible ouverture donnent sensiblement un point comme image d'un point et puissent par suite fournir des images nettes.

411. **Aplanétisme.** — On a cependant cherché, pour augmenter encore la netteté des images, à annuler l'aberration de sphéricité en donnant aux surfaces réfléchissantes une courbure convenable.

On dit qu'un miroir est *aplanétique* lorsque les rayons issus d'un même point vont, après réflexion sur ce miroir, concourir rigoureusement en un point unique.

Les miroirs plans sont les seuls qui soient aplanétiques pour tous les points lumineux, quelle que soit la position de ces points.

Avec les miroirs courbes, on ne peut réaliser l'aplanétisme rigou-

reux que pour un point; mais si les aberrations sont rigoureusement détruites pour un point, elles sont tellement faibles pour les points très voisins, que l'on peut pratiquement obtenir d'un objet convenablement placé une image très nette, pourvu que les dimensions de cet objet ne soient pas trop grandes.

Un miroir sphérique n'est aplanétique que pour un point lumineux situé en son centre, ce point étant d'ailleurs réel au virtuel suivant que le miroir est concave ou convexe. En effet, chaque rayon incident est alors dirigé suivant un rayon de la sphère à laquelle appartient le miroir; chaque rayon incident est donc normal au plan tangent au point d'incidence, et il en est par suite de même de chaque rayon réfléchi dont la direction se confond avec celle du rayon incident correspondant.

Un miroir qui a la forme d'une portion de surface d'un ellipsoïde de révolution est aplanétique pour un point lumineux placé en l'un des foyers de l'ellipsoïde; les rayons issus de l'un de ces foyers vont en effet, après réflexion, concourir à l'autre, d'après les propriétés géométriques de l'ellipsoïde.

Un miroir constitué par un paraboloïde de révolution est de même aplanétique pour des rayons incidents parallèles à son axe; tous ces rayons vont, après réflexion, concourir au foyer du paraboloïde. Réciproquement, tous les rayons issus de ce foyer vont, après réflexion, concourir en un point situé à l'infini sur l'axe et sont donc, après réflexion, rigoureusement parallèles à cet axe. L'aplanétisme d'un tel miroir résulte encore des propriétés géométriques de la surface appelée paraboloïde de révolution.

On voit, d'après ce qui précède, que, pour avoir une image aussi nette que possible d'un petit objet, on aura avantage à prendre un miroir elliptique si l'objet est à une distance finie, un miroir parabolique si l'objet est à l'infini (télescopes).

412. **Emploi des miroirs concaves comme réflecteurs.** — On fait fréquemment usage des miroirs concaves comme réflecteurs, soit pour projeter au loin un faisceau de rayons sensiblement parallèles (phares), soit pour concentrer la lumière émanée d'une source en un point déterminé, mais assez rapproché (préparation microscopique, intérieur de l'œil, membrane du tympan, etc.).

Dans le premier cas, on fait usage d'un miroir parabolique au foyer duquel on place la source lumineuse.

Dans le second cas, on a plus généralement recours aux miroirs sphériques, parfois aux miroirs elliptiques.

L'avantage que présente, dans ce cas, le miroir concave sur le miroir plan résulte clairement de l'inspection de la figure 270. Si, en effet, un faisceau de rayons parallèles $ABIK$ tombe sur le miroir plan IK , le faisceau réfléchi $A'B'IK$ sera lui-même formé de rayons parallèles.

Supposons que l'on substitue au miroir plan IK un miroir concave $I'K'$; les rayons réfléchis correspondant au même faisceau incident iront alors concourir en un point L' , ou tout ou moins, à

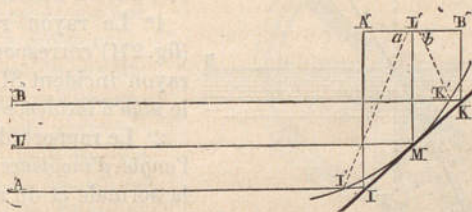


Fig. 270. — Concentration de la lumière par les miroirs concaves.

cause de l'aberration de sphéricité, en une région de petite étendue ab , où se trouvera concentrée toute la lumière qui était répartie sur l'étendue plus large $A'B'$ lorsque la réflexion s'effectuait sur un miroir plan.

Les mêmes effets relatifs subsistent lorsque les rayons incidents, au lieu d'être parallèles entre eux, viennent d'une source lumineuse réelle située à une distance finie quelconque.

CHAPITRE III

RÉFRACTION

413. **Lois élémentaires de la réfraction.** — La réfraction (§ 383), c'est-à-dire le changement de direction que subit un rayon lumineux qui passe d'un milieu dans un autre, est soumise aux lois élémentaires suivantes, dues à Descartes.

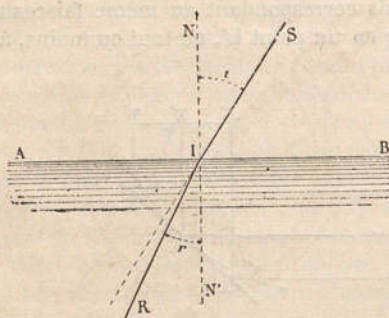


Fig. 271. — Réfraction d'un rayon lumineux.

1° Le rayon réfracté IR (fig. 271) correspondant à un rayon incident SI reste dans le *plan d'incidence* NIS.

2° Le rapport du *sinus* de l'*angle d'incidence* (angle de la normale et du rayon incident) au *sinus* de l'*angle de réfraction* (angle de la normale et du rayon réfracté)

est constant pour deux milieux donnés, quelle que soit la direction du rayon incident.

Si l'on représente par i l'angle d'incidence et par r l'angle de réfraction correspondant, cette seconde loi se traduit par la formule :

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \text{constante.}$$

On désigne généralement cette constante par n et l'on écrit :

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n. \quad (1)$$

Lorsque les angles d'incidence et de réfraction sont très petits, on peut substituer les angles aux sinus et écrire, avec une approximation suffisante :

$$\frac{i}{r} = n, \quad (2)$$

formule dite de Kepler.

Les lois de la réfraction, que nous venons d'énoncer, ne sont exac-

tes que pour les milieux *isotropes*; nous verrons, dans l'Optique physique, comment la réfraction s'effectue dans les corps *anisotropes*.

L'exactitude des lois élémentaires de la réfraction est amplement vérifiée par la confirmation expérimentale des conséquences que l'on déduit de ces lois et dont il sera question dans le présent chapitre. Mais on peut aussi, comme pour la réflexion, vérifier directement par l'expérience, quoique d'une façon seulement approximative, cette exactitude des lois élémentaires de la réfraction.

On se sert à cet effet de l'appareil, représenté sur la figure 272, qui se compose d'un cercle gradué vertical muni en son centre d'une auge cylindrique, dans laquelle on verse de l'eau jusqu'à ce que la surface libre du liquide passe par le centre du cercle; une grande alidade AF, qui porte en M un miroir plan, sert à indiquer la direction du rayon incident et une autre alidade K permet de déterminer la direction du rayon réfracté. Enfin une règle BC, mobile le long du pied vertical de l'appareil, permet de mesurer les perpendiculaires abaissées de F et de K sur la verticale passant par le centre du cercle, perpendiculaires qui sont proportionnelles aux sinus des angles d'incidence et de réfraction.

Lorsque, par une orientation convenable du miroir M, on fait tomber au centre du cercle un rayon incident de direction AF, ce rayon se réfracte en entrant dans l'eau, mais ne subit pas de déviation en traversant la paroi en verre de l'auge cylindrique, car il rencontre normalement cette paroi. La direction qu'il faut donner à l'alidade K, pour que le rayon réfracté passe par la petite ouver-

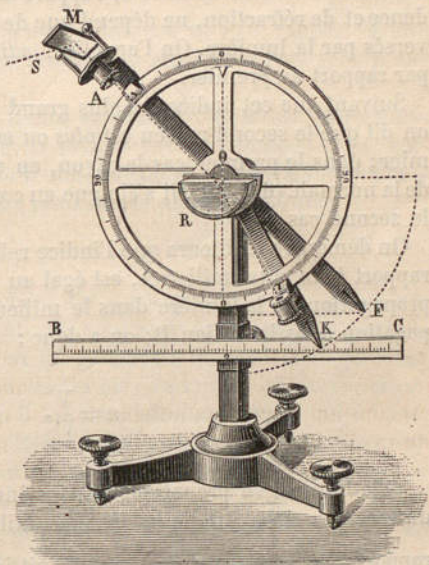


Fig. 272. — Vérification expérimentale des lois de la réfraction.

ture du diaphragme que porte cette alidade, est donc la direction du rayon réfracté dans l'eau. Les mesures, effectuées grâce à la règle BC, des sinus des angles d'incidence et de réfraction, montrent que le rapport de ces sinus est constant, quelles que soient les directions du rayon incident et du rayon réfracté correspondant.

414. **Indices de réfraction. Indices relatifs. Indices absolus.** — La valeur de la constante n , rapport des sinus des angles d'incidence et de réfraction, ne dépend que de la nature des milieux traversés par la lumière. On l'appelle l'*indice relatif* du second milieu par rapport au premier.

Suivant que cet indice est plus grand ou plus petit que l'unité, on dit que le second milieu est *plus* ou *moins réfringent* que le premier; dans le premier cas le rayon, en se réfractant, se rapproche de la normale (fig. 271), il s'éloigne au contraire de la normale dans le second cas.

On démontre d'ailleurs que l'indice relatif n d'un milieu B, par rapport à un autre milieu A, est égal au rapport de la vitesse V de propagation de la lumière dans le milieu A à la vitesse V' de propagation dans le milieu B; on a donc :

$$n = \frac{V}{V'} \quad (3)$$

Si la lumière se propageait en sens inverse, c'est-à-dire passait du second milieu B dans le premier milieu A, l'indice n' de A par rapport à B serait égal à $\frac{V'}{V}$; on déduit immédiatement de là que :

$$n' = \frac{1}{n}$$

Lorsque l'on connaît l'indice m d'un milieu B par rapport à un milieu A et l'indice n d'un milieu C par rapport à B, il est facile d'en déduire l'indice m' de C par rapport à A.

Si, en effet, l'on appelle V , V' , V'' les vitesses de propagation de la lumière dans les milieux A, B, C, on a :

$$m = \frac{V}{V'}, \quad n = \frac{V'}{V''}, \quad m' = \frac{V}{V''}$$

On tire immédiatement de là :

$$m' = \frac{V}{\sqrt{a}} = \frac{V}{\sqrt{a'}} \times \frac{V'}{\sqrt{a}} = mn \quad (4)$$

qui donne la relation cherchée,

et encore :

$$n = \frac{m'}{m} \quad (5)$$

qui montre que l'indice d'une substance C, par rapport à une autre B, est égal au rapport des indices des substances C et B par rapport à une troisième A.

On appelle *indice absolu* d'une substance l'indice de cette substance par rapport au vide. Il résulte immédiatement de la relation (4) que l'indice absolu μ d'une substance est égal à son indice n par rapport à l'air multiplié par l'indice absolu ν de l'air :

$$\mu = n\nu.$$

La détermination des indices des diverses substances est utile à divers titres. L'indice étant une constante spécifique, on peut en effet l'utiliser, au même titre qu'un certain nombre d'autres constantes physiques, pour caractériser les corps; on conçoit, en outre, et nous verrons bientôt qu'il en est réellement ainsi, que la connaissance des indices de réfraction soit nécessaire pour mesurer l'effet réfringent produit par les diverses substances sur les rayons lumineux qui les traversent; enfin la détermination des indices permet de soumettre au contrôle de l'expérience l'exactitude de certaines théories physiques.

Pour toutes ces raisons, les physiciens se sont préoccupés de la détermination expérimentale des indices de réfraction des corps, et un grand nombre de méthodes, dont la description n'entre pas dans le cadre de cet ouvrage, ont été imaginées à cet effet.

En outre de ces méthodes générales, des procédés ou des appareils spéciaux, dont l'étude est du ressort de la Physique biologique, ont été imaginés en vue de la détermination des indices des milieux transparents de l'œil.

415. Angle limite. Réflexion totale. — L'angle d'incidence d'un rayon lumineux, au moment où il atteint la surface de séparation de deux milieux inégalement réfringents, pouvant varier de 0° à 90° , cherchons comment se comporte le rayon réfracté pour les diverses directions du rayon incident.

De la formule (1) (page 572) on tire :

$$\sin r = \frac{\sin i}{n}.$$

Pour $i=0$, on a $\sin i = 0$; par suite $\sin r$ et l'angle r sont égaux à 0 quel que soit n . En d'autres termes, un rayon incident perpendiculaire à la surface de séparation de deux milieux n'est point dévié lorsqu'il passe de l'un des milieux dans l'autre.

Lorsque i est différent de 0 et que n est différent de 1, c'est-à-dire lorsque les deux milieux n'ont pas même réfringence, r est différent de i ; le rayon est donc dévié, et la déviation est représentée

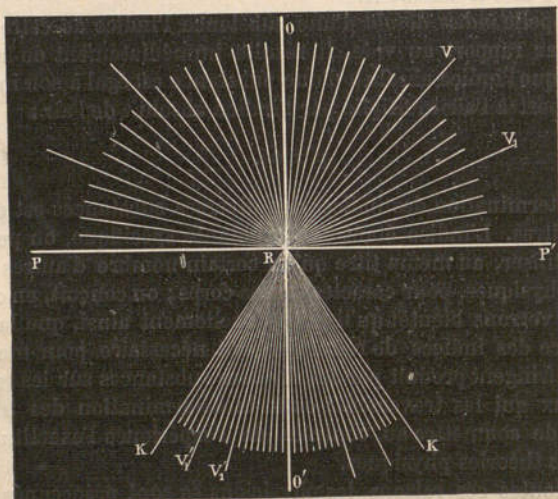


FIG. 100. — Réfraction.

par la différence $i - r$ ou $r - i$ des deux angles i et r ; r sera d'ailleurs plus petit ou plus grand que i , suivant que n sera plus grand ou plus petit que 1, c'est-à-dire suivant que le second milieu sera plus ou moins réfringent que le premier.

Dans le cas de $n > 1$ (second milieu plus réfringent que le premier), l'angle de réfraction, toujours plus petit que l'angle d'incidence, atteint sa valeur maxima λ lorsque $i = 90^\circ$. Cette valeur maxima, plus petite que 90° , est déterminée par la relation :

$$\sin \lambda = \frac{\sin 90}{n} = \frac{1}{n}.$$

L'angle λ porte le nom d'*angle limite*. Il résulte de là que, si l'on fait tomber en un même point R (fig. 273) de la surface de séparation PP' de deux milieux un faisceau incident dont les divers rayons fassent avec la normale OR, et dans tous les plans passant par cette normale, tous les angles compris entre 0° et 90°, l'ensemble des rayons réfractés correspondants formera un cône ayant pour sommet le point d'incidence R, pour axe la normale RO' menée par ce point, dans le second milieu, à la surface de séparation des deux milieux, et pour angle au sommet l'angle limite $\text{KRK} = 2\lambda$.

Considérons maintenant le cas où l'indice, que nous représenterons par n' , est plus petit que 1 (second milieu moins réfringent que le premier); ce cas est réalisé, par exemple, par les deux milieux que nous venons de considérer, en supposant que la lumière se propage d'abord dans le milieu le plus réfringent. L'angle de réfraction est alors toujours plus grand que l'angle d'incidence et devient égal à 90° pour une valeur λ' de l'angle d'incidence donnée par la relation :

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sin \lambda'}{\sin 90} = n', \quad \text{ou :} \quad \sin \lambda' = n'.$$

Si l'on remarque que l'indice n' est égal à $\frac{1}{n}$, n étant comme ci-dessus l'indice du milieu le plus réfringent par rapport à l'autre, on voit que :

$$\sin \lambda' = \frac{1}{n}$$

et que l'angle λ' n'est autre chose que l'angle λ auquel nous avons donné le nom d'angle limite.

En conséquence, si l'on fait tomber, sur la surface de séparation JJ (fig. 274) de deux milieux, des rayons issus d'un point V situé dans le milieu le plus réfringent, ces rayons pénétreront dans le second milieu si l'angle d'incidence est plus petit que λ ; c'est le cas du rayon VL qui se réfracte suivant LV'. Le rayon VL₁, tel que $\text{KVL}_1 = \lambda$, se réfractera suivant L₁J. Quant aux rayons, tels que VL₂, qui font avec la normale KK' un angle $\text{KVL}_2 > \lambda$, les lois de la réfraction ne leur sont plus applicables et c'est à l'expérience qu'il faut s'adresser pour savoir ce qu'ils deviennent. Or l'expérience montre que ces rayons ne pénètrent pas dans le second milieu moins réfringent, et qu'ils se réfléchissent sur la surface de séparation,

en obéissant d'ailleurs aux lois élémentaires de la réflexion. Ce phénomène porte le nom de *réflexion totale*; on exprime par là que toute la lumière est dans ce cas réfléchi par la surface JJ, par opposition avec ce qui se produit pour tout rayon incident tel

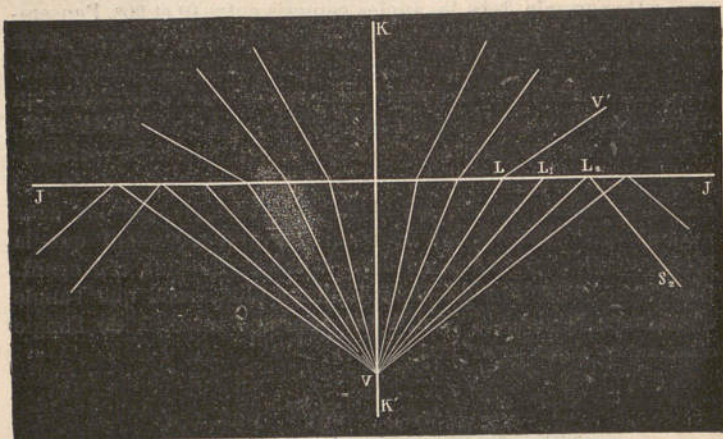


Fig. 274. — Réflexion totale.

que VL qui fait avec la normale un angle inférieur à λ , un tel rayon donne sans doute naissance à un rayon réfléchi, non représenté sur la figure, mais ce rayon réfléchi ne contient qu'une portion de la lumière incidente, puisqu'il existe alors un rayon réfracté LV'.

416. **Retour inverse des rayons.** — Si V et V' représentent les vitesses de propagation de la lumière dans deux milieux successifs, les directions du rayon incident SO (fig. 273) et du rayon réfracté correspondant OR satisfont à la relation :

$$\frac{\sin SOA}{\sin ROB} = \frac{V}{V'} = n. \quad (1)$$

Inversement, si un rayon se propage d'abord dans le second milieu suivant une direction RO, sa direction, après réfraction, fera avec la normale OA à la surface de séparation un angle x tel que :

$$\frac{\sin ROB}{\sin x} = \frac{V'}{V} = \frac{1}{n}. \quad (2)$$

La comparaison des relations (1) et (2) montre immédiatement

que $\sin SOA = \sin x$ ou que $SOA = x$; par suite le rayon réfracté aura la direction OS.

Le même raisonnement est évidemment applicable à chaque réfraction successive que subit un même rayon. D'autre part, ce principe du retour inverse est évidemment vrai pour la réflexion. On peut donc dire d'une manière générale que :

Lorsqu'un rayon lumineux a subi un nombre quelconque de réflexions et de réfractions, si l'on considère un autre rayon dont la direction incidente est exactement inverse de la direction finale du premier et qui subit en ordre inverse les mêmes réflexions et réfractions, ce second rayon suit exactement, en sens inverse, la marche qu'a suivie le premier.

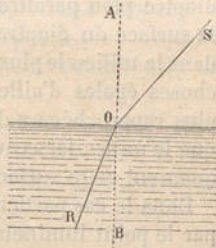


Fig. 275. — Retour inverse des rayons lumineux.

I. — Réfraction à travers les surfaces planes.

417. **Cas d'une seule surface.** — Soient deux milieux indéfinis, air et eau par exemple, limités par une surface plane. On démontre, au moyen de considérations qui ne sauraient trouver place dans cet ouvrage, que la réfraction à travers un pareil système, appelé *dioptré plan*, ne conserve pas au faisceau réfracté l'homocentricité du faisceau incident.

La réfraction à travers un dioptré plan est surtout intéressante à considérer dans le cas où le faisceau incident est très mince, condition qui est sensiblement réalisée par les rayons homocentriques qui, partis d'un point d'un objet situé dans un milieu réfringent limité par un plan, pénètrent dans notre œil à travers la petite ouverture centrale et circulaire de l'iris. On démontre que, dans ce cas, les rayons réfractés se coupent deux à deux suivant deux petites droites dites *droites focales*, non situées dans le même plan, et dont les directions sont perpendiculaires entre elles; l'une de ces droites est dirigée suivant la normale menée par le point lumineux à la surface de séparation des deux milieux, l'autre est perpendiculaire à un plan passant par cette normale et l'œil de l'observateur. Il résulte de là que l'image d'un point vu à travers un dioptré plan n'est pas rigoureusement un point, mais une petite image imparfaite dans laquelle dominent deux droites lumineuses

très courtes. Les dioptrés plans ne donnent donc pas en général d'image nette.

L'image virtuelle, plus ou moins déformée, perçue à travers un dioptré plan paraîtra du reste plus rapprochée ou plus éloignée de la surface du dioptré que l'objet, suivant que celui-ci se trouvera dans le milieu le plus réfringent ou dans le moins réfringent. Toutes choses égales d'ailleurs, l'image imparfaite obtenue est d'autant plus rapprochée ou d'autant plus éloignée de la surface du dioptré que le mince faisceau de rayons qui la forme rencontre plus obliquement cette surface.

Dans le cas particulier où l'œil est placé sur la normale menée par le point lumineux à la surface de séparation des deux milieux, le faisceau réfracté qui traverse la pupille ne renferme que des

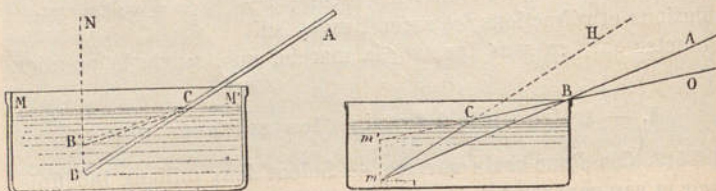


Fig. 276 et 277. — Effets de la réfraction.

rayons sensiblement normaux à la surface du dioptré. Les deux droites focales se confondent sensiblement dans ce cas et l'œil perçoit une image virtuelle assez nette du point lumineux ; cette image est d'ailleurs située sur la normale menée par le point lumineux à la surface réfringente. Si l'on désigne par p et p' les distances du point lumineux et de son image à la surface du dioptré plan, par m et m' les indices absolus, ou relatifs par rapport à un même corps, l'air par exemple, du milieu dans lequel se trouve l'observateur et de celui dans lequel est placé l'objet, on démontre que l'on a :

$$p' = p \frac{m}{m'} = \frac{p}{n},$$

en désignant par n l'indice $\frac{m'}{m}$ (§ 414) du milieu dans lequel se trouve l'objet par rapport à celui dans lequel est placé l'observateur. On voit que l'image sera plus rapprochée ou plus éloignée de l'œil que l'objet, suivant que n sera plus grand ou plus petit que 1.

Des considérations qui précèdent résulte immédiatement l'explication de ces faits, à savoir, qu'un bâton plongé en partie dans l'eau paraît brisé au niveau de la surface liquide (fig. 276), qu'un objet *m* (fig. 277) placé au fond d'un vase rempli d'eau peut être vu d'un point *O* d'où cet objet ne pourrait être aperçu si l'eau n'existait pas, que toute nappe liquide nous paraît moins profonde qu'elle n'est en réalité, etc.

418. Cas de deux surfaces parallèles. Lames à faces parallèles. — Lorsqu'un rayon lumineux traverse une lame à faces parallèles sous une incidence d'ailleurs quelconque, ce rayon est,

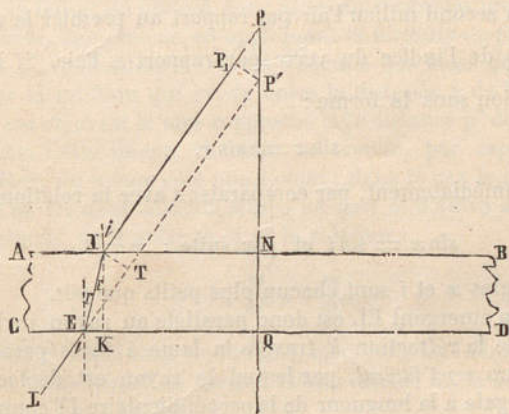


Fig. 278. — Réfraction à travers une lame à faces parallèles.

à sa sortie de la lame, parallèle à la direction qu'il avait avant d'y pénétrer, si le milieu ambiant est le même des deux côtés de la lame.

Soient, en effet, ABCD (fig. 278) une lame à faces parallèles, une lame de verre par exemple, plongée dans l'air, et PI un rayon lumineux qui rencontre la première face de cette lame en faisant, avec la normale IK au point I, un angle *i*. Ce rayon se réfractera et prendra, à l'intérieur de la lame, une direction IE telle que l'angle de réfraction $EIK = r$ satisfasse à la relation :

$$\sin i = n \sin r, \quad (1)$$

en désignant par *n* l'indice de la lame par rapport à l'air.

Le rayon réfracté IE rencontre la seconde face en un point E et fait, avec la normale en ce point, un angle d'incidence qui est égal à r à cause du parallélisme des normales menées en E et en I aux deux faces de la lame. Dès lors, le rayon IE se réfractera, au niveau de la seconde face, en faisant avec la normale menée par E à cette face un angle x tel que :

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

car, le rayon lumineux passant maintenant du verre dans l'air, l'indice du second milieu l'air par rapport au premier le verre est l'inverse $\frac{1}{n}$ de l'indice du verre par rapport à l'air. Si l'on met cette relation sous la forme :

$$\sin x = n \sin r,$$

on voit immédiatement, par comparaison avec la relation (1), que l'on a :

$$\sin x = \sin i \text{ et par suite : } x = i,$$

car les angles x et i sont chacun plus petits que 90° .

Le rayon émergent EL est donc parallèle au rayon incident PI, et l'effet de la réfraction à travers la lame à faces parallèles se réduit à un *rejet latéral*, par lequel le rayon est déplacé d'une quantité égale à la longueur de la perpendiculaire IT commune au rayon incident PI et au rayon réfracté EL.

On démontre que ce déplacement IT est d'autant plus considérable que la lame est plus épaisse, que son indice diffère plus de l'unité et que l'angle d'incidence i est plus grand ; ce même déplacement est toujours nul dans le cas de l'incidence normale.

La valeur du déplacement latéral x est d'ailleurs donnée par la formule :

$$x = e \sin i \left(1 - \frac{\sqrt{1 - \sin^2 i}}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i}} \right)$$

dans laquelle e représente l'épaisseur de la lame.

La propriété des lames parallèles de rejeter latéralement les rayons qui les traversent sous une incidence quelconque a été utilisée par Helmholtz dans la construction d'un instrument appelé *ophthalmomètre* et destiné à permettre d'effectuer, avec

une grande exactitude, la mesure des rayons de courbure de la cornée et des faces du cristallin.

Lorsqu'un faisceau de rayons homocentriques traverse une lame à faces parallèles, chacun des rayons subit un rejet latéral en rapport avec son incidence propre, et le faisceau réfracté n'est plus homocentrique. Toutefois lorsque le faisceau de rayons est très délié, comme celui qui pénètre dans l'œil, les images d'objets vus à travers la lame ont une assez grande netteté.

Le faisceau réfracté reste homocentrique lorsque le faisceau incident, homocentrique lui-même, est très délié et sensiblement normal à la lame; on obtient donc alors de véritables images.

Il est facile, dans ce cas, en appliquant la formule du paragraphe précédent à la réfraction à travers chacune des faces de la lame, de trouver la relation qui existe entre la distance p de l'objet à la face dont cet objet est le plus rapproché et la distance p'' de l'image à l'autre face. Cette image, virtuelle, se trouve, par rapport à la seconde face, du même côté que l'objet; dans le cas le plus général, celui où les deux milieux situés de part et d'autre de la lame sont différents, on a entre p et p'' la relation :

$$p'' = p \frac{m}{m'} + e \frac{m}{m''},$$

e désignant ici l'épaisseur de la lame, m , m' , m'' , les indices absolus du milieu dans lequel se trouve l'observateur, de la lame et du milieu où est placé l'objet.

On a, en particulier, à faire usage de cette formule lorsqu'on emploie la disposition expérimentale de Helmholtz pour la mesure de la distance focale du cristallin.

Dans le cas où les milieux situés de part et d'autre de la lame sont identiques, on a $m'' = m$ et la formule précédente devient :

$$p'' = p + e \frac{m}{m'} = p + \frac{e}{n}$$

$\frac{m'}{m}$ représentant alors (§ 414) l'indice relatif n de la lame par rapport au milieu dans lequel elle est plongée.

Le terme $\frac{e}{n}$ de la relation précédente étant plus petit ou plus grand que e suivant que n est plus grand ou plus petit que 1, on voit que, si l'on regarde un objet à travers une lame réfringente à

faces parallèles, l'image virtuelle sera située plus près ou plus loin que l'objet, suivant que la lame sera plus ou moins réfringente que le milieu ambiant.

419. **Cas de deux surfaces inclinées. Prisme.** — On appelle *prisme*, en Physique, un milieu réfringent terminé par deux faces planes, non parallèles, qui se coupent en conséquence suivant une droite appelée *arête de réfringence*. L'angle des deux faces planes est l'*angle de réfringence* du prisme.

On appelle *section principale* d'un prisme toute section par un plan perpendiculaire à l'arête réfringente.

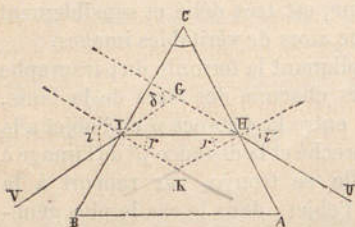


Fig. 279. — Réfraction à travers un prisme.

Dans l'étude de la réfraction d'un rayon lumineux à travers un prisme, nous considérerons seulement le cas où le plan d'incidence de chaque rayon considéré est une section principale.

Soient ABC (fig. 279) une telle section et VI un rayon incident que nous supposerons constitué par une lumière simple; ce rayon se réfractera suivant la direction IH qui fait avec la normale IK au point I un angle $\text{HIK} = r$ satisfaisant à la relation :

$$\sin i = n \sin r, \quad (1)$$

en désignant par n l'indice du prisme par rapport au milieu ambiant et par i l'angle d'incidence. Le rayon réfracté IH rencontre la seconde face AC au point H et fait, avec la normale HK en ce point, un angle IHK que nous appellerons r' ; ce rayon sortira donc du prisme suivant HU, en faisant avec la normale HK au point H un angle i' , tel que :

$$\sin i' = n \sin r'. \quad (2)$$

Si le prisme est plus réfringent que le milieu ambiant, comme on l'a supposé sur la figure, la première réfraction aura pour effet de rapprocher le rayon de la normale, la seconde de l'en écarter, et finalement le rayon sera dévié du côté opposé au sommet, c'est-à-dire vers la *base* du prisme. La première réfraction sera toujours possible; mais la seconde ne le sera que si l'angle r' est inférieur à l'angle limite λ de la substance du prisme par rapport à

l'air; si donc cette condition n'est pas remplie, il y aura en H réflexion totale.

On démontre, d'ailleurs, que si l'angle de réfringence du prisme est plus grand que le double de l'angle limite, aucun des rayons qui pénètrent dans le prisme ne peut en sortir, chacun d'eux subissant la réflexion totale.

Lorsque le prisme est moins réfringent que le milieu ambiant, les phénomènes sont inverses de ceux que nous venons de décrire; le rayon est dévié vers le sommet du prisme et la réflexion totale peut alors se produire sur la face d'entrée.

420. **Angle de déviation.** — On appelle *angle de déviation* l'angle δ formé par les directions VG et GU du rayon incident et du rayon émergent correspondant.

On voit que, dans le cas représenté sur la figure, cet angle δ , extérieur au triangle GIH, est égal à la somme des angles intérieurs non adjacents de ce même triangle; on a donc, pour la valeur de la déviation :

$$\begin{aligned} \delta &= \text{GIH} + \text{GHI} = (i - r) + (i' - r') \\ \text{ou} \quad \delta &= i + i' - (r + r'), \end{aligned} \quad (3)$$

mais l'angle K, considéré comme appartenant au triangle IKH, a pour supplément la somme $r + r'$; d'autre part, ce même angle K, considéré comme appartenant au quadrilatère KICH dont les angles en I et H sont droits, a pour supplément l'angle de réfringence $\text{ICH} = \alpha$ du prisme. Il résulte de là que :

$$r + r' = \alpha; \quad (4)$$

par suite, on a, en portant dans (3) :

$$\delta = i + i' - \alpha. \quad (5)$$

Les relations (4) et (5) sont générales, si l'on fait, relativement aux signes de i , i' , r , r' , les conventions suivantes. Les angles i et i' seront considérés comme positifs lorsqu'ils seront situés, à partir de la normale, vers le côté opposé à celui de l'arête du prisme (cas de la figure), et comme négatifs lorsqu'ils seront comptés du côté de cette arête; les angles r et r' seront, au contraire, regardés comme positifs ou négatifs, suivant qu'ils seront situés, à partir de la normale, du côté de l'arête du prisme ou du côté opposé.

Les relations (3) et (4) montrent que l'angle de déviation δ dépend de l'angle de réfringence α du prisme, de la valeur de l'angle d'incidence i et de celle de l'angle i' , et par suite de la valeur de l'indice n du prisme.

On peut montrer que δ dépend de α , de i et de n au moyen d'un

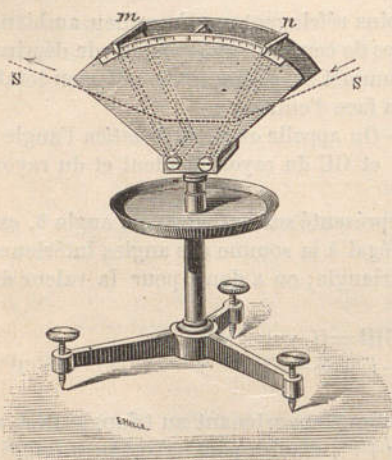


Fig. 280. — Prisme à angle variable.

prisme à angle variable. On appelle ainsi une cuve dont deux parois sont fixes et parallèles, tandis que les deux autres, n et m (fig. 280), constituées par des lames de verre à faces parallèles qui forment les faces du prisme, sont perpendiculaires aux premières et mobiles autour de deux charnières horizontales, de manière à former entre elles un angle de réfringence de grandeur variable.

Lorsque cette cuve est pleine de liquide et traversée par un faisceau

de rayons, on constate que la direction des rayons émergents change avec l'incidence des rayons à l'entrée, avec l'angle de réfringence ainsi qu'avec la nature, et par suite avec l'indice du liquide qui constitue la substance du prisme.

421. **Minimum de déviation.** — L'expérience montre que, lorsqu'on fait varier l'incidence du rayon qui traverse un prisme dont l'angle de réfringence est invariable, la déviation du rayon émergent est minima pour une certaine direction du rayon incident. On peut, d'ailleurs, déduire l'existence du minimum de déviation de la considération des formules précédentes, et démontrer que la déviation est minima lorsque $i=i'$, ce qui entraîne $r=r'$, c'est-à-dire lorsque la direction du rayon réfracté, à l'intérieur du prisme, est perpendiculaire à la bissectrice de l'angle de réfringence C (fig. 279).

L'indice de réfraction du prisme peut être exprimé d'une façon simple en fonction du minimum de déviation Δ .

Si, en effet, l'on suppose $i=i'$ et $r=r'$ dans les formules (4) et (5), il vient :

$$r = \frac{\alpha}{2},$$

et

$$\Delta = 2i - \alpha,$$

d'où :

$$i = \frac{\alpha + \Delta}{2}.$$

En portant ces valeurs de i et de r dans la formule (1) résolue par rapport à n , il vient :

$$n = \frac{\sin \frac{\alpha + \Delta}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}},$$

formule qui permet de déterminer l'indice de réfraction n d'une substance taillée en forme de prisme, lorsque l'on connaît α et Δ .

Dans le cas où l'angle de réfringence du prisme est très faible, l'expression de la déviation minima devient remarquablement simple. En effet, la formule de Kepler étant alors applicable, on peut remplacer i par nr ou par $n\frac{\alpha}{2}$ dans l'expression de Δ ; il vient donc :

$$\Delta = n\alpha - \alpha = (n-1)\alpha.$$

Si le prisme est en verre, $n = \frac{3}{2}$, et la déviation minima est alors égale à la moitié de l'angle de réfringence :

$$\Delta = \frac{\alpha}{2}.$$

Ce résultat est applicable aux prismes employés en Ophtalmologie, car leur orientation réalise toujours sensiblement, pour les rayons utilisés, les conditions relatives à la déviation minima. C'est pour cette raison que les oculistes caractérisent les divers prismes qu'ils emploient par le nombre qui représente la moitié de l'angle de réfringence exprimé en degrés de la circonférence.

422. **Image d'un point vu à travers un prisme.** — La réfraction à travers un prisme détruit l'homocentricité des rayons incidents et ne donne donc pas d'images nettes. Toutefois, lorsque le faisceau incident est assez mince et que la direction moyenne des

rayons qui le constituent satisfait à la condition du minimum de déviation, à un faisceau incident homocentrique issu de O (fig. 281) correspond un faisceau émergent sensiblement homocentrique, de sommet O' , et la netteté de l'image est assez grande. On démontre que, dans ce cas, l'image virtuelle O' est à très peu près à la même distance du prisme que le point-objet O lui-même. Cette image paraît, d'ailleurs, déviée vers l'arête réfringente (fig. 281) ou vers la

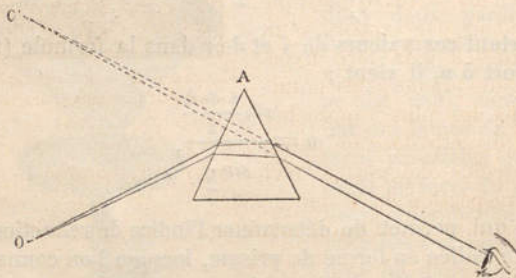


Fig. 281. — Image d'un point vu à travers un prisme.

base du prisme, suivant que la substance de celui-ci est plus ou moins réfringente que le milieu ambiant,

Ce que nous venons de dire d'un point lumineux s'applique aux objets suffisamment petits ou suffisamment éloignés du prisme pour que tous les rayons qu'ils envoient sur celui-ci soient sensiblement dans les conditions du minimum de déviation.

D'après ce qui a été dit plus haut, les conditions d'emploi des prismes en Ophtalmologie sont précisément celles qui correspondent au maximum de netteté de l'image.

423. Prismes à réflexion totale. — Nous avons déjà fait remarquer (§ 419) qu'un rayon qui a pénétré dans un prisme plus réfringent que le milieu ambiant était réfléchi totalement, lorsqu'il faisait, avec la normale au point d'émergence, un angle supérieur à l'angle limite. La valeur de cet angle limite est, dans le cas du verre, de 41° .

Lorsqu'un prisme est destiné à produire la réflexion totale, on lui donne en général une forme telle que sa section droite soit un triangle rectangle isocèle. On peut d'ailleurs faire que la direction du rayon émergent soit perpendiculaire ou parallèle à celle du rayon incident. Les figures 282 et 283 montrent comment on peut obtenir l'un ou l'autre de ces résultats.

Il faut remarquer toutefois que, si l'on regarde un objet par réflexion totale à travers un prisme, l'image paraîtra, dans le premier cas, symétrique de l'objet par rapport à la face hypothénuse du prisme ; dans le second cas, cette image occupera sensiblement la même position que l'objet, mais sera symétrique de cet objet par rapport à un plan parallèle à la face hypothénuse du prisme ; les points de l'objet les plus rapprochés du plan de cette face en paraîtront les plus éloignés, et réciproquement, comme le montre la simple inspection de la figure 283.

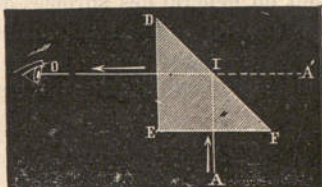


Fig. 282. — Prisme à réflexion totale (rayon émergent perpendiculaire au rayon incident).

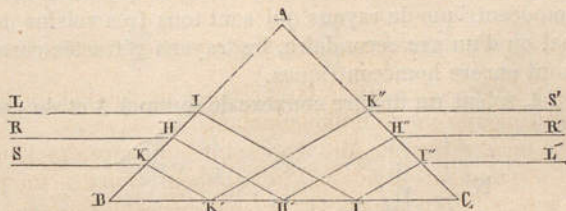


Fig. 283. — Prisme à réflexion totale (rayon émergent parallèle au rayon incident).

instruments d'optique, en particulier dans le microscope et l'ophtalmoscope binoculaires, qui sont destinés à donner le relief des préparations microscopiques et des parties profondes de l'œil.

II. — Réfraction de la lumière à travers les surfaces courbes.

424. **Dioptrés sphériques.** — L'ensemble de deux milieux indéfinis réfringents, dont la surface de séparation est sphérique, constitue un *dioptré sphérique simple*. L'association de plusieurs dioptrés simples constitue un *dioptré composé*. L'importance de l'étude de la réfraction à travers de telles surfaces est évidente, si l'on remarque que les lentilles, qui sont constituées par l'association de deux dioptrés sphériques, sont utilisées pour la correction

des anomalies de la vision, et font partie d'un grand nombre d'instruments et d'appareils employés soit en Physique, soit en Médecine. En outre, les dioptries oculaires, cornée et faces du cristallin, sont en général des surfaces de révolution, et la réfraction, dans les conditions d'étendue dans lesquelles ces dioptries interviennent pendant la vision, se ramène alors à la réfraction à travers les sphères tangentes aux sommets de ces dioptries.

A. — CAS D'UNE SEULE SURFACE OU DIOPTRÉ SIMPLE.

423. **Dioptré sphérique simple. Image d'un point lumineux.** — Un dioptré sphérique simple est dit *convexe* ou *concave* suivant que la surface présente sa convexité ou sa concavité aux rayons incidents. Les termes de *centre de courbure*, *pôle*, *axe principal*, *axe secondaire*, *ouverture* du dioptré, ont la même signification que pour les miroirs sphériques (§ 396).

Lorsqu'on fait tomber sur un dioptré sphérique un mince faisceau homocentrique de rayons qui sont tous très voisins de l'axe principal ou d'un axe secondaire, les rayons réfractés correspondants sont encore homocentriques.

En effet, soient un dioptré convexe de sommet A et de centre C

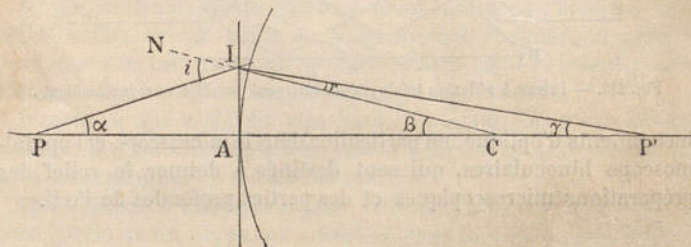


Fig. 284. — Image d'un point lumineux donné par un dioptré sphérique simple.

(fig. 284), un point lumineux P situé sur l'axe principal, un rayon incident PI très voisin de cet axe, et le rayon réfracté correspondant IP'. La surface du dioptré se confondant avec son plan tangent au sommet dans le voisinage de ce point, nous exprimerons, sur la figure, que le rayon PI est très voisin de l'axe, en considérant le point I comme situé sur le plan tangent en A au dioptré.

Le point I étant très voisin de A, l'angle d'incidence $\text{PIN} = i$ et

l'angle de réfraction $P'IC = r$ sont assez petits pour que l'on puisse employer la formule de Kepler :

$$i = nr, \quad (1)$$

n étant l'indice du second milieu par rapport au premier.

Or, les angles PIN d'une part, ACI de l'autre, étant extérieurs aux triangles PIC et ICP' , on a :

$$\text{angle } PIN = i = \text{angle } IPC + \text{angle } ICP = \alpha + \beta, \quad (2)$$

$$\text{angle } ACI = \beta = \text{angle } CIP' + \text{angle } IP'C = r + \gamma; \quad (3)$$

$$\text{de (3) on tire :} \quad r = \beta - \gamma. \quad (4)$$

Mais un angle a pour mesure le rapport de l'arc compris entre ses côtés au rayon avec lequel cet arc a été décrit. D'autre part, le point I étant, par hypothèse, très voisin de A , la perpendiculaire IA à l'axe principal peut être regardée comme égale à chacun des trois arcs décrits de P , C et P' comme centres avec des rayons PI , CI et $P'I$. On a donc :

$$\text{angle } \alpha = \frac{IA}{PI}, \quad \text{angle } \beta = \frac{IA}{CI}, \quad \text{angle } \gamma = \frac{IA}{P'I};$$

en portant dans (2) et (4), on obtient :

$$i = \frac{IA}{PI} + \frac{IA}{CI} \quad \text{et} \quad r = \frac{IA}{CI} - \frac{IA}{P'I}.$$

Remplaçant alors i et r par ces valeurs dans (1), il vient :

$$\frac{IA}{PI} + \frac{IA}{CI} = n \left(\frac{IA}{CI} - \frac{IA}{P'I} \right).$$

Or I étant très voisin de A , on peut supposer que

$$PI = PA = p, \quad P'I = P'A = p'.$$

On obtient donc, en divisant par IA et posant $CI = CA = R$:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{R} = n \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{p'} \right)$$

ou

$$\frac{1}{p} + \frac{n}{p'} = \frac{n-1}{R}. \quad (5)$$

La longueur p' et par suite la position de P' ne dépend donc que de p et de R ; en conséquence, tous les rayons incidents issus

de P iront, après réfraction, et dans les conditions d'exactitude de la formule (5), c'est-à-dire en ne considérant que les seuls rayons très voisins de l'axe CA, concourir en P'.

La relation (5) est d'ailleurs générale et s'applique à toutes les positions de P, si l'on regarde p comme positif ou négatif suivant qu'il est compté, à partir de A, du côté d'où vient la lumière ou du côté opposé et si l'on fait pour le signe de p' des conventions exactement inverses. Il résulte d'ailleurs de ces conventions que, comme pour les miroirs, l'objet et l'image sont réels ou virtuels, suivant que p et p' sont positifs ou négatifs.

La formule (5) s'applique aussi aux dioptrés concaves, si l'on a soin d'affecter R du signe $-$, ce qui revient à regarder le rayon de courbure comme positif ou négatif suivant qu'il est compté, à partir de A, du côté d'où ne vient pas la lumière ou du côté opposé.

Les points de concours P et P' des rayons incidents et réfractés sont dits *foyers conjugués*.

426. **Foyers principaux** — On appelle foyers principaux d'un dioptré sphérique simple :

1° Le point de concours des rayons incidents auxquels correspondent des rayons réfractés parallèles à l'axe principal; nous désignerons ce point sous le nom de *premier foyer principal* et nous le représenterons toujours par la lettre F (fig. 285);

2° Le point de concours des rayons réfractés correspondant à des rayons incidents parallèles à l'axe principal; nous appellerons ce point *second foyer principal*, et nous le désignerons dans tous les cas par F' (fig. 285).

Le *second foyer principal* est donc l'image, donnée par le dioptré, d'un point situé à l'infini; le *premier* est au contraire un point dont l'image se forme à l'infini. Il suffira par suite, pour avoir les distances f' et f de ces deux foyers au pôle du dioptré, de faire dans la formule (5), $p = \infty$ pour le *second foyer* et $p' = \infty$ pour le *premier*. Il vient alors, pour $p = \infty$:

$$\frac{n}{p} = \frac{n}{f} = \frac{n-1}{R}, \quad \text{d'où : } f' = \frac{nR}{n-1}, \quad (6)$$

pour $p' = \infty$:

$$\frac{1}{p} = \frac{1}{f} = \frac{n-1}{R}, \quad \text{d'où : } f = \frac{R}{n-1}. \quad (7)$$

On voit immédiatement qu'il existe entre ces deux distances focales les deux relations simples suivantes :

$$f' - f = r \quad \frac{f'}{f} = n.$$

Donc : 1° les deux foyers sont à égale distance du point M qui est situé au milieu entre le centre de courbure O et le pôle A du dioptré ; 2° le rapport de la seconde à la première distance focale est

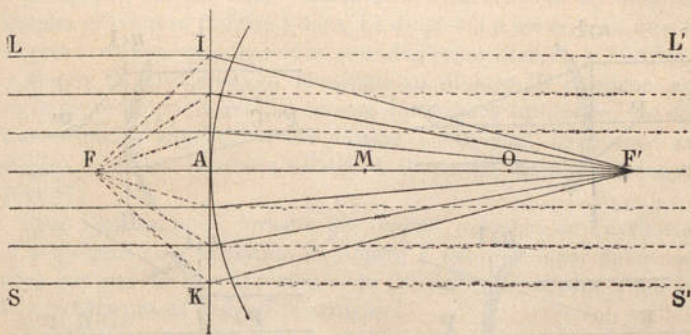


Fig. 285. — Foyers principaux d'un dioptré simple.

égal à l'indice du second des deux milieux qui constituent le dioptré par rapport au premier ou au rapport $\frac{m'}{m}$ des indices absolus m' et m du second et du premier milieu.

Si l'on retournait le dioptré par rapport au sens de la propagation de la lumière, le *second foyer* deviendrait le *premier* et le *premier* deviendrait le *second*.

427. **Diverses espèces de dioptrés sphériques simples.** — Les distances focales étant des valeurs particulières de p et de p' , les conventions de signes relatives à ces distances p et p' doivent être étendues aux distances focales ; les signes de f et de f' indiqueront dès lors si les foyers principaux sont réels ou virtuels.

Les divers cas qui peuvent se présenter peuvent être déduits des formules (6) et (7) dans lesquelles on attribuera à R des valeurs positives ou négatives et à n des valeurs plus petites ou plus grandes que 1. Les résultats de cette discussion sont consignés dans le tableau suivant :

- I. $R > 0$ et $(n-1) > 0$ ou $n > 1$; on a alors $f > 0$ et $f' > 0$
 II. $R < 0$ et $(n-1) < 0$ ou $n < 1$ — $f > 0$ et $f' > 0$
 III. $R < 0$ et $(n-1) > 0$ ou $n > 1$ — $f < 0$ et $f' < 0$
 IV. $R > 0$ et $(n-1) < 0$ ou $n < 1$ — $f < 0$ et $f' < 0$

Il existe donc quatre espèces de dioptrés simples que l'on peut définir ainsi qu'il suit :

I. — Dioptré convexe, dont le second milieu est plus réfringent que le premier (fig. 286, I). Les deux foyers principaux F et F' sont réels et le dioptré est dit *convergent*.

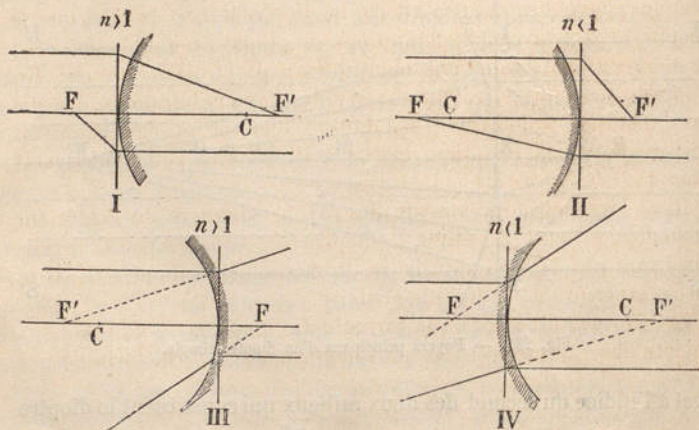


Fig. 286. — Diverses espèces de dioptrés sphériques simples.

II. — Dioptré concave, dont le second milieu est moins réfringent que le premier (fig. 286, II). Les deux foyers principaux sont réels et le dioptré est encore dit *convergent*.

III. — Dioptré concave, dont le second milieu est plus réfringent que le premier (fig. 286, III). Les deux foyers principaux sont *virtuels* et le dioptré est dit *divergent*.

IV. — Dioptré convexe, dont le second milieu est moins réfringent que le premier (fig. 286, IV). Les deux foyers principaux sont encore *virtuels* et le dioptré est encore dit *divergent*.

Dans chacun de ces divers cas, les distances focales sont toujours données par les expressions, $f = \frac{R}{n-1}$ pour la première, $f' = \frac{nR}{n-1}$

pour la seconde; mais n est plus grand ou plus petit que 1, suivant que le second milieu est plus ou moins réfringent que le premier.

Si l'on suppose que ces divers dioptrés sont constitués par les mêmes milieux, dont l'ordre de succession change seul, l'indice qui entre dans la valeur des distances focales des dioptrés II et IV est l'inverse de celui qui entre dans les distances focales des dioptrés I et III. La première et la deuxième distance focale des dioptrés II et IV sont, dans ces conditions, respectivement égales à la deuxième et à la première distance focale des dioptrés I et III.

Les quatre cas que nous venons de considérer pour les dioptrés simples peuvent se réduire à deux. Le dioptré II n'est en effet que le dioptré I retourné par rapport au sens de propagation de la lumière; le dioptré IV est également identique au dioptré III retourné. En vertu du principe du retour inverse des rayons lumineux, les divers résultats applicables au dioptré I le seront également au dioptré II et les résultats relatifs à III seront également exacts pour IV.

Dans l'œil humain, lorsque des rayons viennent de l'extérieur et se dirigent vers la rétine, le dioptré I est réalisé par la cornée ainsi que par la face antérieure du cristallin, le dioptré II par la face postérieure de la lentille oculaire.

428. **Formes diverses de la formule des dioptrés.** — Si l'on tient compte des valeurs trouvées plus haut pour f et f' , la formule :

$$\frac{1}{p} + \frac{n}{p'} = \frac{n-1}{R} \quad (I)$$

peut se mettre sous les diverses formes suivantes :

$$\frac{1}{p} + \frac{n}{p'} = \frac{n}{f} \quad (I)$$

$$\frac{1}{p} + \frac{n}{p'} = \frac{1}{f'} \quad (II)$$

$$\frac{f}{p} + \frac{f'}{p'} = 1. \quad (III)$$

Ces formules s'appliquent aux dioptrés convergents et divergents, à la seule condition de donner dans chaque cas aux distances f et f' le signe qu'elles doivent avoir.

Si l'on exprime p et p' en fonction des distances q et q' de l'objet au premier foyer principal F et de l'image au second foyer princi-

pal F' , et que l'on porte ces valeurs dans (1), la formule prend, après simplification, la forme simple suivante :

$$qq' = ff', \quad (IV)$$

à laquelle on donne quelquefois le nom de *formule simplifiée*.

Dans cette formule, q est regardé comme positif ou négatif suivant qu'il est compté, à partir de F , du côté d'où vient la lumière ou en sens inverse, tandis que q' doit être affecté du signe $+$ ou du signe $-$ suivant qu'il est compté, à partir de F' , du côté d'où ne vient pas la lumière ou en sens inverse.

429. Plans focaux. — Les lieux géométriques des foyers principaux des axes secondaires du dioptré sont évidemment deux petites surfaces sphériques, décrites du centre de courbure du dioptré avec des rayons respectivement égaux à f' et à f , et ayant pour pôles les foyers F' et F . Dans le cas où l'on ne considère, comme nous l'avons supposé, que des axes secondaires très peu inclinés sur l'axe principal, les calottes sphériques qui représentent les lieux géométriques des foyers principaux de ces axes sont suffisamment petites pour se confondre avec leurs plans tangents en F' et F , plans auxquels on donne le nom de *plans focaux*.

Le *second plan focal*, plan mené par F' perpendiculairement à l'axe principal, jouit donc de cette propriété, que tous les rayons incidents parallèles à un axe secondaire prennent, après réfraction par le dioptré, des directions qui vont se couper au point où l'axe secondaire rencontre ce plan.

Le *premier plan focal*, plan mené par F perpendiculairement à l'axe principal, jouit de cette propriété, que tous les rayons dont les directions passent par un même point de ce plan sont, après réfraction, parallèles à l'axe secondaire passant par ce point.

430. Construction géométrique du rayon réfracté correspondant à un rayon incident quelconque. — Les propriétés des plans focaux permettent de trouver facilement la direction du rayon réfracté correspondant à un rayon incident quelconque QI (fig. 287 et fig. 288).

Il suffit, en effet, de mener par le point N où la direction du rayon incident rencontre le *premier plan focal*, l'axe secondaire ON ; le rayon réfracté sera la parallèle menée par le point d'incidence I à cet axe, car, en vertu des propriétés du *premier plan focal*, tous les rayons incidents dont les directions passent par le point N doivent, après réfraction, être parallèles à l'axe secondaire NO qui passe par ce point.

On peut encore mener l'axe secondaire ON' parallèle au rayon incident. La direction du rayon réfracté s'obtient alors en joignant le point N' , où cet axe rencontre le *second plan focal*, au point d'inci-

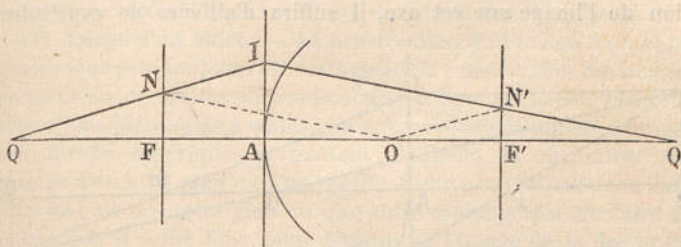


Fig. 287. — Dioptr convergent ; construction du rayon réfracté correspondant à un rayon incident quelconque.

dence I ; en vertu de la propriété du *second plan focal*, tous les rayons incidents parallèles à l'axe secondaire ON' doivent en effet, après réfraction, avoir des directions qui vont se couper au point N' où cet axe secondaire rencontre le *second plan focal*.

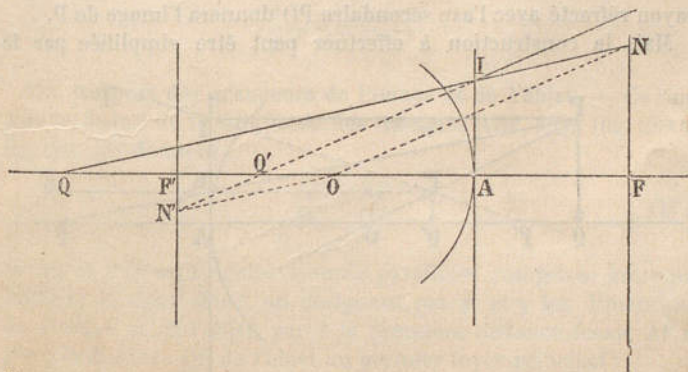


Fig. 288. — Dioptr divergent ; construction du rayon réfracté correspondant à un rayon incident quelconque.

Ces constructions sont générales; elles donnent aussi le moyen de déterminer le foyer conjugué Q' d'un point quelconque Q situé sur l'axe principal.

431. Construction géométrique de l'image d'un point situé en dehors de l'axe principal. — Un raisonnement analogue à celui

que nous avons fait à propos des miroirs (§ 400) montrerait que l'image d'un point tel que P (fig. 289 et fig. 290) doit se trouver sur l'axe secondaire PO passant par ce point. Pour déterminer la position de l'image sur cet axe, il suffira d'ailleurs de construire,

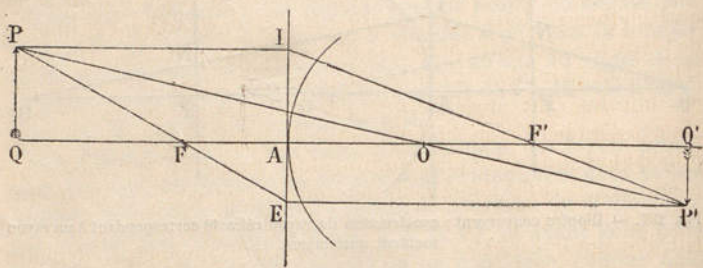


Fig. 289. — Dioptr convergent; image d'un point situé en dehors de l'axe principal; image d'une droite perpendiculaire à l'axe.

comme nous venons de l'indiquer, le rayon réfracté correspondant à un rayon incident quelconque issu de P; l'intersection de ce rayon réfracté avec l'axe secondaire PO donnera l'image de P.

Mais la construction à effectuer peut être simplifiée par le

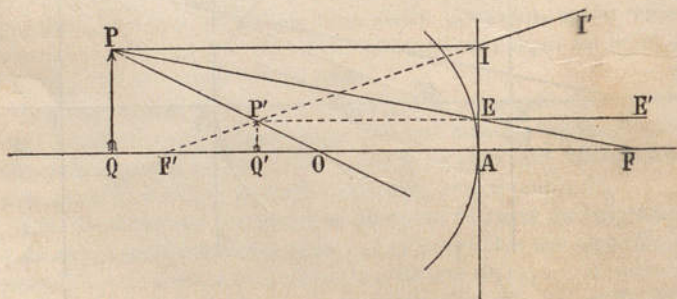


Fig. 290. — Dioptr divergent; image d'un point situé en dehors de l'axe principal; image d'une droite perpendiculaire à l'axe.

choix d'un rayon incident convenable. On peut en effet considérer le rayon incident PI parallèle à l'axe principal; la direction du rayon réfracté correspondant devra passer par le *second foyer principal* F'. Il suffit donc de mener la droite IF' pour avoir l'image P' de P.

On peut encore considérer le rayon incident PF dont la direction passe par le *premier foyer principal* F; le rayon réfracté correspondant, parallèle à l'axe principal, est dirigé suivant la droite EP' qui coupe l'axe secondaire PO en P' où se trouve donc l'image de P.

432. **Image d'un objet.** — La construction de l'image d'un objet quelconque peut toujours être ramenée à la construction des images de plans ou de droites perpendiculaires à l'axe principal. Des considérations identiques à celles que nous avons présentées à propos des miroirs sphériques permettent d'ailleurs de démontrer que l'image d'un petit plan ou d'une petite droite perpendiculaire à l'axe principal est un autre plan ou une autre droite perpendiculaire au même axe. Il suffit donc, pour déterminer l'image de la droite PQ par exemple (fig. 289 et fig. 290), de chercher, comme nous l'avons fait, l'image P' du point P et de mener par P' une perpendiculaire à l'axe principal; P'Q' sera l'image de PQ.

Les positions de l'image et de l'objet, c'est-à-dire les distances QA = p et Q'A = p' de l'image et de l'objet au sommet du dioptré, satisfont d'ailleurs à la formule des dioptrés :

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

433. **Rapport des grandeurs de l'image et de l'objet.** — Ce rapport se déduit de la similitude des triangles AEF, PQF (fig. 289 et fig. 290) qui donnent :

$$\frac{AE}{PQ} = \frac{AF}{QF}, \quad (1)$$

Or AE et P'Q' sont égales comme parallèles comprises entre parallèles; il vient donc, en désignant par y' et y les dimensions de l'image et de l'objet, par f la première distance focale AF et par q la distance QF de l'objet au premier foyer principal :

$$\frac{y'}{y} = \frac{AF}{QF} = \frac{\pm f}{q}; \quad (V \text{ et } V')$$

en tenant compte de l'équation qq' = ff', qui donne $\frac{f}{q} = \frac{q'}{f'}$, on peut écrire encore :

$$\frac{y'}{y} = \frac{\pm q'}{f'}. \quad (VI \text{ et } VI')$$



Ce rapport peut être obtenu sous une autre forme. On a, en effet, dans le cas d'un dioptré convergent (fig. 289) :

$$\frac{AF}{QF} = \frac{AF}{QA - AF},$$

et par suite :

$$\frac{y'}{y} = \frac{f}{p - f}. \quad (\text{VII})$$

Dans le cas des dioptrés divergents (fig. 290), on a de même :

$$\frac{AF}{QF} = \frac{AF}{QA + AF},$$

et par suite :

$$\frac{y'}{y} = \frac{-f}{p - f}. \quad (\text{VII}')$$

Ces formules donneraient lieu aux mêmes considérations de signe que les formules analogues des miroirs (voir la note p. 561).

Si l'on met, dans le cas des dioptrés divergents, le signe négatif de f en évidence, il vient :

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

On voit que ces relations sont identiques aux relations correspondantes des miroirs sphériques.

434. Point et plan principal. Points et plans antiprincipaux. — Les formules

$$\frac{1}{p} + \frac{n}{p'} = \frac{1}{f} \quad \text{et} \quad \frac{y'}{y} = \frac{\pm f}{p - f}$$

montrent que, pour $p=0$, on a $p'=0$ et $y'=y$. Donc, lorsque l'objet est au pôle même d'un dioptré, l'image, qui se forme au même point, est égale en grandeur à l'objet; une construction géométrique ou une discussion de signes montre en outre que cette image est droite par rapport à l'objet. Le pôle des dioptrés a été appelé, comme celui des miroirs et pour la même raison, *point principal* et le plan tangent à ce pôle a reçu le nom de *plan principal*.

Nous verrons bientôt que ce point principal se dédouble dans les systèmes réfringents centrés et que les deux points principaux alors existant jouent, en même temps que d'autres points que nous ferons alors connaître, un rôle très important dans l'étude de la réfraction à travers de tels systèmes.

Les formules précédentes, ou une construction géométrique,

montrent de même que, pour $p=2f$, on a $p'=2f'$ et $y'=y$. En d'autres termes, si un objet perpendiculaire à l'axe principal est situé, du côté du premier foyer principal, à une distance $2f$ de la surface d'un dioptré, l'image correspondante se fait, du côté du second foyer principal, à une distance $2f'$ de la même surface; en outre l'image est égale à l'objet, et renversée par rapport à celui-ci, comme le montreraient la construction ou une discussion de signes. Les plans dans lesquels se trouvent alors l'objet et son image portent le nom de *premier* et de *second plan antiprincipaux*; les points où ces plans coupent l'axe principal sont dits *premier* et *second points antiprincipaux*.

435. **Discussion algébrique des formules.** — Nous considérerons seulement le cas des dioptrés convergents. Si dans les formules

$$\frac{f}{p} + \frac{f'}{p'} = \frac{1}{f} \quad \text{et} \quad \frac{y'}{y} = \frac{f}{p-f},$$

on donne successivement à p toutes les valeurs possibles depuis $+\infty$ jusqu'à $-\infty$, les valeurs correspondantes de p' et de $\frac{y'}{y}$ feront connaître la position de l'image et le rapport de grandeur de l'image à l'objet.

Les résultats de cette discussion sont contenus dans le tableau suivant :

$p = +\infty$	$p' = f'$	$y' = 0$	Image renversée et réelle.
$p > 2f$	$p' < 2f'$	$y' < y$	Image renversée et réelle.
$p = 2f$	$p' = 2f'$	$y' = y$	Image renversée et réelle.
$p < 2f$	$p' > 2f'$	$y' > y$	Image renversée et réelle.
$p = f$	$p' = \pm \infty$	$y' = \infty$	
$p < f$	$p' < 0$	$y' > y$	Image droite et virtuelle.
$p = 0$	$p' = 0$	$y' = y$	Image droite.
$p < 0$	$p' > 0$	$y' < y$	Image droite et réelle.
p aug. en val. abs.	p' aug. en val. abs.		
$p = -\infty$	$p' = f'$	$y' = 0$	Image droite et réelle.

La planche II représente, comme la planche analogue relative aux miroirs, les résultats de la discussion précédente. On y a pris pour objet une droite perpendiculaire à l'axe, de grandeur invariable, que l'on a successivement considérée dans une série de positions 1, 2, 3, ..., comprises entre $+\infty$ et $-\infty$ et dont on a chaque

fois déterminé l'image correspondante $1', 2', 3', \dots$, au moyen de la construction indiquée plus haut.

La ligne $5' \dots 3'$ qui limite la grandeur de l'image a reçu encore de Gariel le nom de *caractéristique* de l'image par rapport au dioptré considéré.

Comme pour les miroirs, la planche II permet de schématiser d'une manière simple les résultats de la discussion.

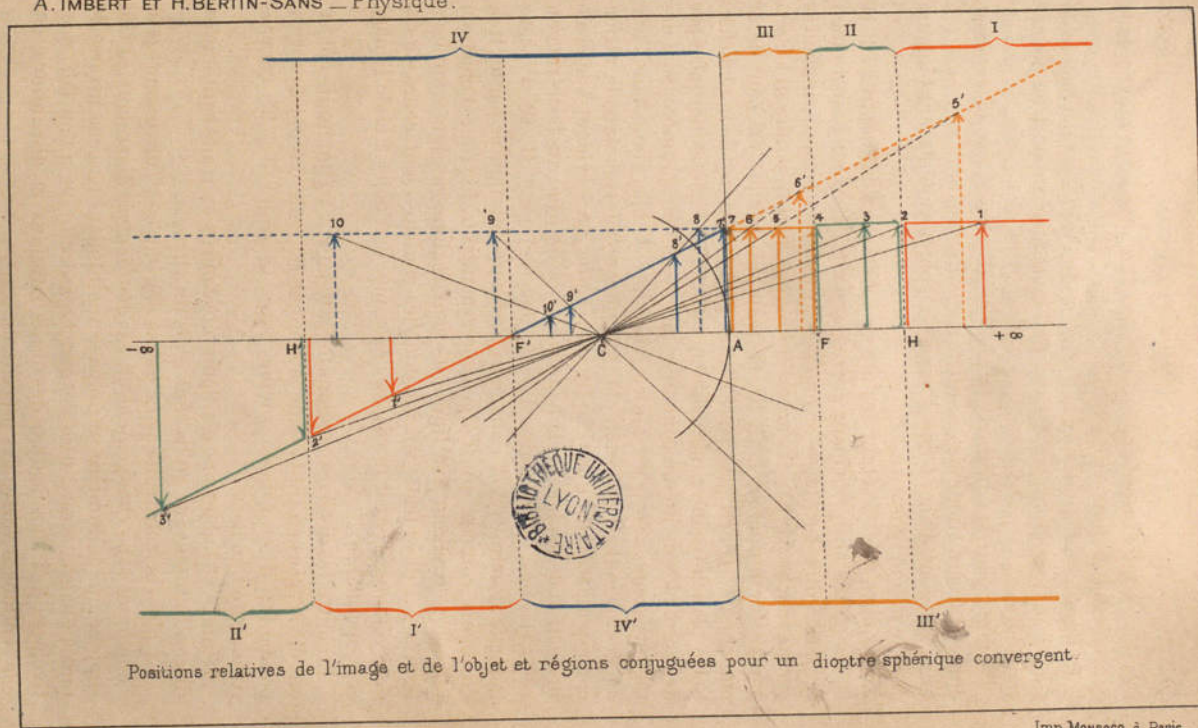
On voit tout d'abord que l'image et l'objet se déplacent toujours dans le même sens.

En outre, F et F' étant les foyers principaux du dioptré et H et H' les points antiprincipaux correspondants, divisons l'espace total compris entre $+\infty$ et $-\infty$ en deux groupes de régions, indiquées sur la planche : 1° par des accolades rouges, vertes, jaunes et bleues, 2° par les numéros, I, II, III, IV pour un groupe (en haut de la planche), I', II', III', IV' pour l'autre groupe (en bas de la planche). Cette planche montre immédiatement que les régions marquées par des accolades de même couleur et par les mêmes numéros sont des régions *conjuguées*, c'est-à-dire telles que, l'objet étant dans l'une de ces régions, il par exemple, son image se forme dans la région correspondante II' . Pour rendre ce résultat plus évident à la seule inspection de la planche, l'objet a été représenté par des traits rouges, verts, jaunes, bleus suivant celle des régions I, II, III, IV dans laquelle il se trouve, et l'image a été chaque fois figurée par un trait de même couleur que l'objet correspondant. Lorsque l'objet ou l'image se trouvent à la limite de deux régions contiguës, on les a figurés par deux traits voisins dont les couleurs sont celles de ces deux régions. Tel est le cas, par exemple, de l'objet 2 et de l'image correspondante $2'$.

En outre les diverses portions de la ligne $1 \dots 10$ qui limite l'objet, ont été tracées en traits dont la couleur est celle des objets correspondants; il en est de même pour la droite $5' \dots 3'$, caractéristique de l'image.

L'image et l'objet ont d'ailleurs été figurés en traits continus ou discontinus suivant qu'ils sont réels ou virtuels.

La planche construite pour le cas des dioptrés convergents peut s'appliquer sans changement au cas des dioptrés divergents, si l'on suppose que la lumière se propage maintenant en sens inverse de tout à l'heure, c'est-à-dire de gauche à droite, et si l'on fait, relativement à la signification des traits continus et discontinus, des conventions inverses des précédentes.



PARIS — J.B. BAILLIÈRE ET FILS.

Imp. Monrocq à Paris.

436. **Aberrations de sphéricité. Caustiques.** — Lorsque les rayons incidents homocentriques ne sont pas tous très voisins de l'axe principal ou d'un axe secondaire, la réfraction à travers un dioptré sphérique simple ne conserve pas, en général, l'homocentricité du faisceau, sauf lorsque les rayons incidents concourent, réellement ou virtuellement, au centre de courbure du dioptré.

Dans le cas, par exemple, où les rayons incidents sont parallèles à l'axe principal, les rayons marginaux, tels que LI, SK (fig. 291),

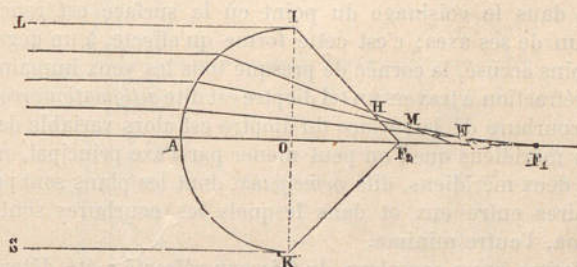


Fig. 291. — Aberrations de sphéricité dans les dioptrés.

les plus éloignés de l'axe, vont, après réfraction, rencontrer l'axe principal en un point F_2 , tandis que les rayons centraux, plus voisins de l'axe, vont, après réfraction, couper cet axe en un point F_1 plus éloigné du pôle du dioptré que F_2 .

Ce défaut d'homocentricité du faisceau réfracté constitue, comme pour les miroirs, l'*aberration de sphéricité*. Il y a lieu dès lors de mesurer, en quelque sorte, ce défaut d'homocentricité par l'*aberration longitudinale* et par l'*aberration latérale*, dont les définitions sont d'ailleurs identiques à celles que nous avons données pour les miroirs (§ 410).

Les intersections successives H, M, N des rayons réfractés voisins sont situées, dans le plan de la figure, sur une courbe appelée *caustique par réfraction*, et les courbes analogues, qui existent dans chacun des méridiens que l'on peut mener par l'axe principal, forment une *surface caustique*.

Les dioptrés qui conservent l'homocentricité des rayons réfractés sont appelés *aplanétiques*. De même que dans la réflexion, une surface réfringente n'est aplanétique que pour un faisceau incident déterminé; un dioptré sphérique, par exemple, n'est aplanétique que pour son centre de courbure. Il n'existe pas de surface

réfringente qui soit aplanétique pour tous les faisceaux incidents homocentriques, quelle que soit leur direction.

437. Réfraction astigmatique régulière. — Lorsque la surface d'un dioptré n'est pas symétrique autour d'un axe, l'homocentricité ne subsiste pas dans le faisceau réfracté, même lorsque le faisceau incident est très mince et que ses rayons sont peu inclinés par rapport à la surface.

Nous ne considérerons ici que le cas où la surface du dioptré peut être assimilée à la portion d'un ellipsoïde à trois axes inégaux située dans le voisinage du point où la surface est rencontrée par l'un de ses axes; c'est cette forme qu'affecte, à un degré plus ou moins accusé, la cornée de presque tous les yeux humains.

La réfraction à travers un tel dioptré est dite *astigmatique régulière*.

La courbure de la surface du dioptré est alors variable dans les divers méridiens que l'on peut mener par l'axe principal, mais il existe deux méridiens, dits *principaux*, dont les plans sont perpendiculaires entre eux et dans lesquels les courbures sont l'une maxima, l'autre minima.

La forme, assez complexe, du faisceau réfracté a été déterminée théoriquement par le géomètre français Sturm. Elle est représentée, autant que la chose est possible sur un plan, par la figure 292.

En A se trouve le sommet d'un ellipsoïde à trois axes inégaux dont les méridiens principaux sont l'un horizontal, l'autre vertical, le premier de ces méridiens étant celui dans lequel la courbure est minima, le second celui dans lequel la courbure est maxima; les rayons incidents sont supposés venir de l'infini, parallèlement à l'axe principal AF'.

Les seuls rayons réfractés qui rencontrent l'axe AF' sont :

1° Ceux qui proviennent de rayons incidents situés dans le plan de la courbure minima HAH' et qui vont concourir en un foyer principal F';

2° Ceux qui proviennent de rayons incidents situés dans le plan de la courbure maxima VAV' et qui vont concourir en un autre foyer principal F.

Le foyer F est d'ailleurs plus rapproché du sommet A que le foyer F', puisqu'il correspond à la réfraction à travers une courbure plus forte.

Aucun autre rayon ne rencontre l'axe AF' de l'ellipsoïde; mais tous les rayons réfractés, sans exception, ont des directions telles qu'ils rencontrent deux droites, dites *focales*, hh' et vv'. Les deux

droites focales passent respectivement par les foyers principaux F et F' des méridiens principaux; chacune d'elles est en outre perpendiculaire au méridien par le foyer duquel elle passe. Les direc-

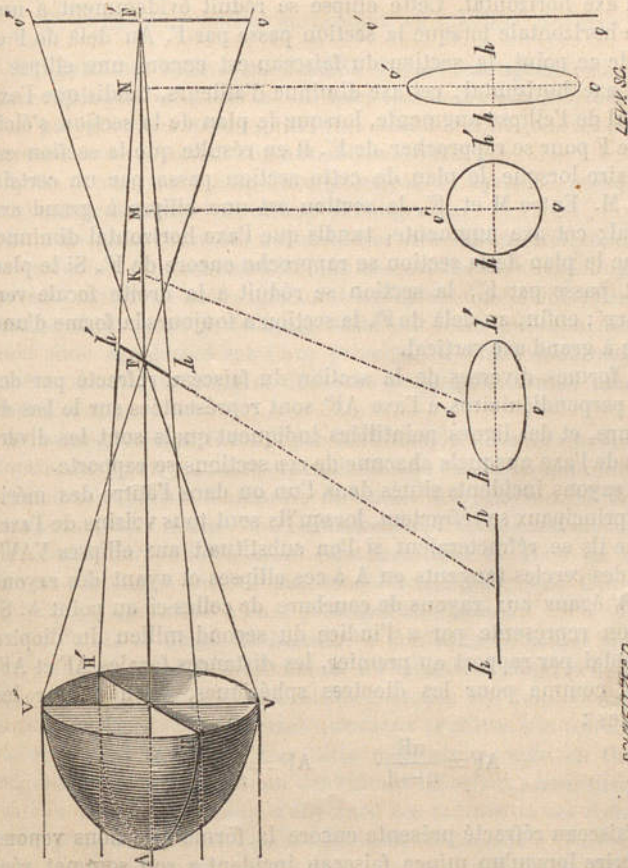


Fig. 292. — Réfraction astigmatique régulière

DUMETIÈRE

tions des droites focales sont en conséquence perpendiculaires l'une à l'autre.

La forme du faisceau réfracté est complètement définie par ce que nous venons de dire; mais, pour achever d'en donner une idée bien nette, il est utile de faire connaître encore la forme des

sections obtenues en coupant ce faisceau par des plans perpendiculaires à l'axe AF' et menés à diverses distances de A.

Lorsque le plan de la section est situé entre le sommet A et la première droite focale hh' , la section a la forme d'une ellipse à grand axe horizontal. Cette ellipse se réduit évidemment à une droite horizontale lorsque la section passe par F. Au delà de F et près de ce point, la section du faisceau est encore une ellipse à grand axe horizontal; cet axe diminue d'ailleurs, tandis que l'axe vertical de l'ellipse augmente, lorsque le plan de la section s'éloigne de F pour se rapprocher de F' . Il en résulte que la section est circulaire lorsque le plan de cette section passe par un certain point M. Entre M et F' , la section est une ellipse à grand axe vertical; cet axe augmente, tandis que l'axe horizontal diminue, lorsque le plan de la section se rapproche encore de F' . Si le plan sécant passe par F' , la section se réduit à la droite focale verticale vv' ; enfin, au delà de F' , la section a toujours la forme d'une ellipse à grand axe vertical.

Ces formes diverses de la section du faisceau réfracté par des plans perpendiculaires à l'axe AF' sont représentées sur le bas de la figure, et des lignes pointillées indiquent quels sont les divers points de l'axe auxquels chacune de ces sections se rapporte.

Les rayons incidents situés dans l'un ou dans l'autre des méridiens principaux se réfractent, lorsqu'ils sont tous voisins de l'axe, comme ils se réfracteraient si l'on substituait aux ellipses VAV' , HAH' des cercles tangents en A à ces ellipses et ayant des rayons R et R' égaux aux rayons de courbure de celles-ci au point A. Si donc on représente par n l'indice du second milieu du dioptré ellipsoïdal par rapport au premier, les distances focales AF et AF' seront, comme pour les dioptrés sphériques, données par les formules :

$$AF = \frac{nR}{n-1}, \quad AF' = \frac{nR'}{n-1}.$$

Le faisceau réfracté présente encore la forme que nous venons de décrire lorsqu'un mince faisceau incident a son sommet, réel ou virtuel d'ailleurs, situé à distance finie du point A; il en est de même encore lorsque plusieurs dioptrés sont associés pour former un système réfringent complexe, comme dans l'œil humain.

Il est nécessaire de connaître la forme de faisceau réfracté, que nous venons de décrire, pour expliquer les troubles de vision

caractéristiques d'une anomalie très fréquente de la vision connue sous le nom d'*astigmatisme*, et due à ce que la cornée a une forme assimilable à celle d'un ellipsoïde à trois axes inégaux.

B. — CAS D'UN NOMBRE QUELCONQUE DE SURFACES CENTRÉES.

438. **Systèmes sphériques centrés. Foyers conjugués.** — Un système réfringent *complexe* est dit *sphérique centré* lorsqu'il est constitué par divers dioptrés sphériques simples dont tous les centres de courbure se trouvent sur une même droite.

Cette droite représente l'axe principal du système, puisqu'elle est normale à toutes les surfaces réfringentes.

Si nous nous bornons à considérer des rayons très voisins de l'axe principal, l'homocentricité d'un faisceau incident sera conservée après réfraction à travers chacun des dioptrés du système; par suite l'image d'un point quelconque situé sur l'axe principal sera un point situé également sur l'axe principal. Il existe donc, dans un système centré, des couples de foyers conjugués, comme dans un dioptré simple.

De même, l'image, fournie par la réfraction à travers le premier dioptré, d'une petite droite perpendiculaire à l'axe principal, sera une petite droite perpendiculaire à ce même axe; le second dioptré donnera de cette image une seconde image constituée encore par une droite perpendiculaire à l'axe principal et ainsi de suite; l'image définitive donnée par le système centré sera donc une droite perpendiculaire à l'axe principal du système.

439. **Points et plans cardinaux.** — Il résulte de ce qui précède que, en appliquant successivement à chacun des dioptrés d'un système centré les constructions et les formules des dioptrés simples, on pourra résoudre les diverses questions relatives à la réfraction à travers un tel système. Mais cette méthode, simple en théorie, entraîne des constructions ou des calculs laborieux; heureusement que l'on peut se dispenser d'effectuer ces calculs ou ces constructions, grâce à la considération des *points cardinaux*.

On appelle ainsi six points qui jouissent de propriétés que nous allons faire connaître, dont la détermination peut être effectuée, comme nous le démontrerons, soit par des constructions géométriques, soit par le calcul, et dont la considération est seule utile pour la solution des diverses questions relatives à la réfraction à travers les systèmes centrés.

Les six points cardinaux sont : 1° deux *points focaux* ou *foyers principaux*; 2° deux *points* dits *principaux*; 3° deux *points* dits *nodaux*.

Points focaux. — On les définit comme les points correspondants d'un dioptré simple.

Le *premier point focal* Φ (fig. 293) est le point de concours des rayons incidents qui, après réfraction à travers tout le système, ont parallèles à l'axe du système.

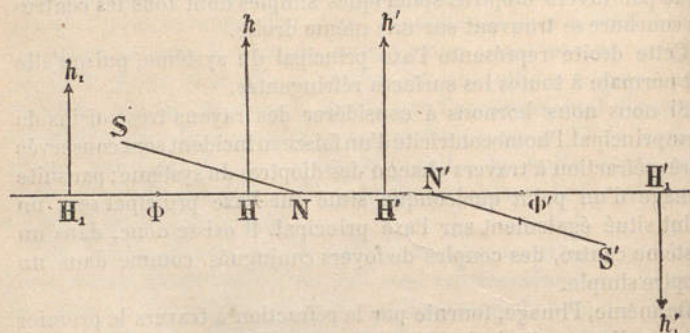


Fig. 293. — Points principaux d'un système centré.

Le *deuxième point focal* Φ' est le point de concours des rayons réfractés qui correspondent à des rayons incidents parallèles à l'axe du système.

Points principaux. — On appelle ainsi deux foyers conjugués H, H' tels que, si un objet Hh est situé au premier point principal H , l'image correspondante $H'h'$, située au second point principal, est égale en grandeur à l'objet et droite par rapport à celui-ci.

Points nodaux. — Ce sont deux foyers conjugués N et N' tels que, à tout rayon incident dont la direction SN passe par le premier point nodal, correspond, après réfraction à travers le système centré, un rayon réfracté dont la direction $N'S'$ passe par le second point nodal N' et qui est parallèle au rayon incident SN .

À ces points, il y a lieu de joindre :

1° deux *plans focaux*, ou plans perpendiculaires à l'axe principal menés par chacun des points focaux, plans qui jouissent de propriétés analogues à celles des plans focaux des dioptrés simples; le premier plan focal, considéré seulement dans le voisinage de l'axe, est un plan tel que tous les rayons incidents dont la direc-

tion passe par l'un de ses points sont, après réfraction, parallèles entre eux; le second plan focal principal, est un plan tel que tous les rayons incidents parallèles dont la direction est peu inclinée sur l'axe principal, prennent, après réfraction, des directions qui vont se couper en un point de ce plan;

2° deux *plans principaux*, ou plans perpendiculaires à l'axe principal menés par chacun des points principaux et dont les propriétés, comme nous le verrons, résultent immédiatement de celles des points principaux eux-mêmes.

Les points focaux, principaux et nodaux ne sont pas les seuls couples de points remarquables que l'on rencontre dans un système dioptrique centré. Il existe, en particulier, des points dits *antiprincipaux* H , et H' , qui sont des foyers conjugués tels que, si un objet H_1h_1 est situé au premier point antiprincipal H_1 , l'image correspondante $H'_1h'_1$, située au second point antiprincipal, est égale en grandeur à l'objet et renversée par rapport à celui-ci. Mais les points focaux, principaux et nodaux sont les seuls qu'il soit utile de connaître pour pouvoir résoudre les diverses questions relatives à la réfraction à travers un système centré.

Nous indiquerons d'abord comment on peut, par des constructions géométriques, déterminer, pour tout système centré, les positions des points focaux, principaux et nodaux; nous montrerons ensuite comment, grâce à ces points et aux plans focaux et principaux, on peut trouver le foyer conjugué d'un point quelconque ou l'image d'un objet donné; nous exposerons enfin sommairement la méthode qui permet de calculer les positions des points cardinaux d'un système centré quelconque.

440. **Détermination géométrique des points focaux et principaux et des plans correspondants.** — Soient quatre milieux quelconques séparés par des surfaces sphériques A_1, A_2, A_3 (fig. 294) dont les centres de courbure C_1, C_2, C_3 sont sur une même droite, cas qui est réalisé, quant au nombre de dioptries simples constituants, par l'œil humain. Soient F_1, F_2, F_3 et F'_1, F'_2, F'_3 , les premiers et les seconds foyers des divers dioptries simples qui composent ce système centré, la lumière se propageant de gauche à droite sur la figure.

Points et plans focaux. — Considérons un rayon incident KI_1 parallèle à l'axe du système. En appliquant à ce rayon les constructions relatives aux dioptries simples (§ 430), on verra qu'il se réfracte successivement suivant I_1I_2 , puis suivant I_2I_3 , enfin suivant I_3K' et qu'il va alors rencontrer l'axe en Φ' ; ce point Φ' sera donc le

second foyer principal du système et le plan mené par Φ' sera le second plan focal.

Supposons pour un instant que la lumière se propage en sens inverse et considérons encore un rayon incident $K'E_3$ parallèle à l'axe.

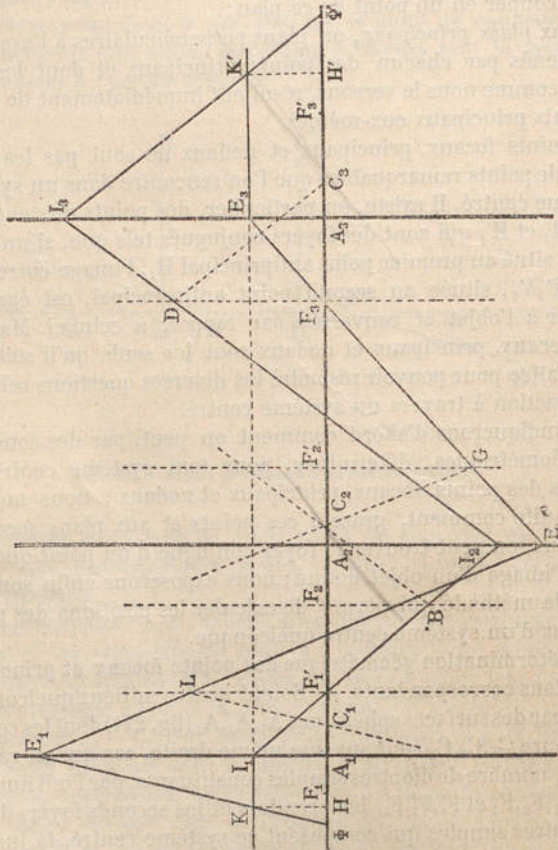


Fig. 264. — Détermination géométrique des points cardinaux d'un système sphérique centré quelconque.

Les premiers foyers des dioptrés simples deviennent maintenant les seconds et réciproquement ; le nouveau rayon se réfractera donc suivant E_3E_2 , puis suivant E_2E_1 , enfin suivant E_1K et ira alors rencontrer l'axe du système en Φ . Ce point Φ sera le premier foyer principal du système centré, dans le cas où la lumière se propage,

comme nous l'avons supposé en premier lieu, de gauche à droite; en effet un rayon incident tel que ΦE_1 suit alors, en vertu du principe du retour inverse des rayons (§ 416), la marche $\Phi E_1, E_1 E_3, E_3 E_3$ et sort du système suivant la direction $E_3 K'$, c'est-à-dire parallèlement à l'axe. Le plan mené par Φ perpendiculairement à cet axe est le premier plan focal.

Points et plans principaux. — Sur la figure, les deux rayons KI_1 et KE_3 , dont il vient d'être question, ont été pris également éloignés de l'axe $A_1 A_3$, c'est-à-dire tels que $I_1 A_1 = E_3 A_3$. Dans ces conditions, les points principaux sont les points H et H', pieds des perpendiculaires abaissées des points K et K' sur l'axe du système. En effet, si nous regardons le point K comme un point lumineux, les deux rayons KI_1 et KE_3 , issus de ce point, sortiront du système avec les directions $I_3 \Phi'$ et $E_3 K'$ qui se rencontrent en K', où se trouvera donc l'image de K. Par suite, l'image de l'objet KH sera la droite KH', qui est égale à l'objet et droite par rapport à lui.

Il résulte de là que H et H' sont les points principaux et que les plans menés par ces points, perpendiculairement à l'axe, sont les plans principaux.

La propriété suivante des plans principaux résulte immédiatement de celle des points principaux : Lorsqu'un rayon incident quelconque PI (fig. 296) rencontre le premier plan principal d'un système en un point A, le rayon réfracté correspondant rencontre le second plan principal en un point A' situé à la même distance et du même côté de l'axe que le point A.

En effet, d'après la propriété des points principaux, à un objet HA correspond une image H'A' égale à HA; A' est par suite l'image de A. Or, le rayon incident PI passant par A, le rayon réfracté correspondant passera par l'image de A, c'est-à-dire par le point A'.

Si l'on voulait obtenir les points et les plans antiprincipaux, il suffirait de considérer le rayon incident KI_1 (fig. 294) et un second rayon incident symétrique de KE_3 par rapport à l'axe $A_1 A_3$.

441. Détermination géométrique des points nodaux. — Les points focaux et principaux une fois déterminés, il est facile de trouver les points nodaux.

Soit, en effet, un système sphérique centré quelconque représenté (fig. 295) par ses points focaux Φ, Φ' et par ses points principaux H, H'; menons les plans focaux et principaux et considérons un rayon incident SI parallèle à l'axe. Ce rayon rencontre le pre-

mier plan principal en I, et, d'après la propriété des plans principaux, le rayon réfracté correspondant coupera le second plan principal en un point I' situé à la même distance de l'axe; de plus, ce rayon devra passer par le second foyer Φ' et aura donc la direction I' Φ' . D'autre part, la direction SI du rayon incident coupe le premier plan focal en A; mais tous les rayons passant par A sont, après réfraction, parallèles entre eux (propriété du premier plan focal); or, l'un de ces rayons réfractés étant I' Φ' , tous les autres seront parallèles à cette direction. Considérons dès lors le rayon incident AN qui, passant par A, est déjà parallèle à I' Φ' ; le rayon réfracté correspondant sera parallèle à I' Φ' et par suite à AN; en outre ce rayon réfracté devra passer par le point E' du second plan princi-

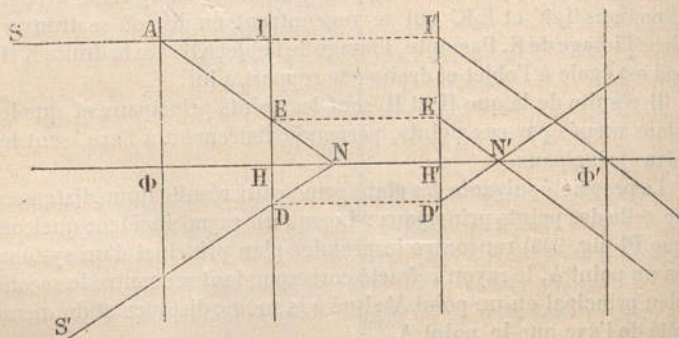


Fig. 295. — Système sphérique centré; détermination géométrique des points nodaux.

pal tel que $E'H' = EH$. Le rayon réfracté correspondant au rayon incident AN sera donc E' N' mené par E' parallèlement à I' Φ' ou à AN.

Les deux points N et N' sont les points nodaux. En effet ces deux points sont des foyers conjugués, puisque ce sont les points où l'axe est rencontré par le rayon incident AN et par le rayon réfracté correspondant E' N' . Le point N' est donc l'image de N, et à tout rayon incident S'N passant par N correspond un rayon réfracté D'N' passant par N'. De plus le rayon réfracté D'N' est toujours parallèle au rayon incident correspondant S'N. En effet, les triangles rectangles EHN et E'H'N' étant égaux, comme ayant un côté $EH = E'H'$ par construction et les angles aigus égaux par suite du parallélisme de EN et de E' N' , il en résulte que $H'N' = HN$.

Ceci posé, le rayon incident quelconque $S'N$ coupant le premier plan principal en D , le rayon réfracté correspondant $D'N'$ devra couper le second plan principal en un point D' tel que $D'H' = DH$; dès lors les triangles rectangles DHN , $D'H'N'$ seront égaux, puisque DH et HN sont respectivement égaux à $D'H'$ et à $H'N'$, ce qui entraîne le parallélisme de DN et de $D'N'$. Donc à tout rayon incident passant par N correspond un rayon réfracté passant par N' et parallèle au rayon incident. Les points N et N' sont donc bien les points nodaux du système.

La construction géométrique qui nous a permis d'obtenir le point N montre que la distance ΦN est précisément égale à la distance $\Phi'H'$; il est de même facile de voir que $\Phi'N'$ est égal à ΦH . Il suffit donc, pour trouver les points nodaux N et N' , de porter, à partir de Φ et de Φ' , des longueurs respectivement égales à $\Phi'H'$ et à ΦH , mais en sens inverse.

Il résulte encore de ce qui précède que la distance NN' des points nodaux est la même que la distance HH' des points principaux.

442. Construction géométrique du rayon réfracté correspondant à un rayon incident quelconque. — Nous avons dit plus haut (§ 439) que la connaissance des positions des points et plans cardinaux, que nous venons d'apprendre à déterminer par de simples considérations géométriques, était suffisante pour la résolution des diverses questions relatives à la réfraction à travers un système dioptrique centré. Pour montrer l'exactitude de cette affirmation, nous devons maintenant indiquer comment, grâce à ces points et à ces plans, on peut déterminer : 1° le rayon réfracté correspondant à un rayon quelconque ; 2° l'image d'un objet également quelconque.

Considérons d'abord la première de ces deux questions.

Soit un système centré représenté par ses plans focaux et principaux et par ses points nodaux (fig. 296) et soit un rayon incident quelconque PI . Ce rayon rencontrant le premier plan principal en A , le rayon réfracté passera par le point A' obtenu en menant AA' parallèle à l'axe PP' .

D'un autre côté, tous les rayons qui, à l'incidence, passent par le point I du premier plan focal seront parallèles entre eux à l'émergence. Cette direction commune des rayons réfractés sera d'ailleurs parallèle à IN , puisque ce dernier rayon, d'après la propriété des points nodaux, sort du système avec une direction parallèle à sa direction d'entrée. Le rayon réfracté correspondant au rayon incident PI s'obtiendra donc en menant par A' une parallèle $A'P'$ à IN .

On peut dire encore que tous les rayons qui, à l'entrée, sont parallèles à PI vont, à la sortie, passer par un même point du second plan focal. Or le rayon SN , parallèle à PI , donne le rayon réfracté $N'K$, qui, parallèle à SN , rencontre le plan focal en K . Le

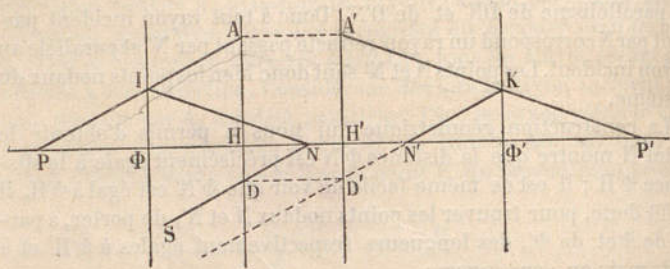


Fig. 296. — Système sphérique centré; construction géométrique du rayon réfracté correspondant à un rayon incident quelconque.

rayon réfracté correspondant à PI devra donc passer par K et s'obtiendra, par conséquent, en menant $N'K$ parallèle à SN ou à PI et en joignant ensuite A' et K .

Ces constructions permettent de déterminer l'image P' d'un point quelconque P situé sur l'axe principal.

443. Construction géométrique de l'image d'un objet. — La solution de cette deuxième question résulte des considérations suivantes.

Soient un système sphérique centré représenté par ses points et plans cardinaux, et PQ (fig. 297) un objet de petite dimension que nous supposons constitué par une petite droite perpendiculaire à l'axe principal. Nous avons fait remarquer que l'image d'une telle droite, donnée par le système sphérique centré, était constituée par une autre droite perpendiculaire à l'axe; pour avoir cette image, il suffira donc de déterminer l'image de l'extrémité P de l'objet.

Pour cela, considérons le rayon incident PI , parallèle à l'axe, qui, d'après ce que nous savons (§ 441), donnera le rayon réfracté $I\Phi'$. Soit PK un second rayon, issu de P et passant par le premier foyer principal Φ du système; le rayon réfracté correspondant devra passer par le point K' du second plan principal, tel que $K'H' = KH$ et émerger parallèlement à l'axe suivant $K'P'$. Les deux rayons réfractés $I\Phi'$ et $K'P'$ se rencontrent en P' , qui sera

l'image de P; la droite P'Q', perpendiculaire à l'axe QQ', sera par conséquent l'image de l'objet PQ.

On aurait pu, pour déterminer P', considérer le rayon incident PN, auquel correspond un rayon réfracté qui passe par N' et dont la direction N'P' est parallèle à PN.

On voit que l'extrême simplicité des constructions est absolument indépendante du nombre des dioptrés simples qui constituent le système centré. Ces constructions ne font pas connaître, il est vrai, les directions des rayons dans leur passage à travers les dioptrés

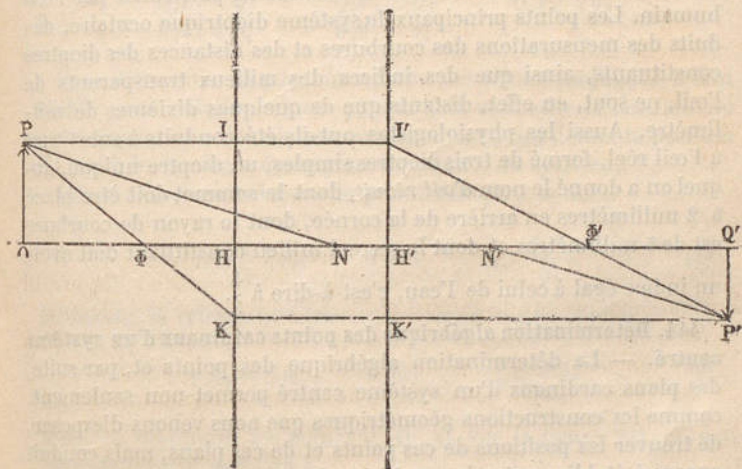


Fig. 297. — Système sphérique centré: construction géométrique de l'image d'une droite perpendiculaire à l'axe principal.

successifs, ni les images intermédiaires d'un objet; elles donnent seulement les directions d'émergence et l'image définitive, mais ces indications sont les seules dont on ait besoin dans l'étude de la réfraction à travers les systèmes centrés.

Les positions relatives des points cardinaux ne sont pas toujours telles que nous les avons représentées sur les figures 295, 296 et 297; mais les constructions indiquées ci-dessus s'appliquent à tous les cas, à la condition de considérer toujours les points Φ , H et N pour les rayons incidents, les points Φ' , H' et N' pour les rayons réfractés, ces points étant caractérisés par ce qui a été dit à leur sujet dans les paragraphes précédents.

Remarquons encore que les constructions des rayons et des images, dans les systèmes sphériques centrés, sont absolument analogues aux constructions correspondantes pour les dioptries simples; elles se réduisent d'ailleurs à celles-ci, dans le cas des systèmes que nous appellerons plus loin *inéquifocaux*, si l'on suppose les deux points principaux H et H' confondus en un seul point qui devient le sommet du dioptrie simple; les deux points nodaux coïncident alors et représentent le centre de courbure de ce dioptrie.

Cette condition est sensiblement réalisée en particulier par l'œil humain. Les points principaux du système dioptrique oculaire, déduits des mensurations des courbures et des distances des dioptries constituants, ainsi que des indices des milieux transparents de l'œil, ne sont, en effet, distants que de quelques dixièmes de millimètre. Aussi les physiologistes ont-ils été conduits à substituer à l'œil réel, formé de trois dioptries simples, un dioptrie unique, auquel on a donné le nom d'*œil réduit*, dont le sommet doit être placé à 2 millimètres en arrière de la cornée, dont le rayon de courbure est de 5 millimètres et dont le second milieu constituant doit avoir un indice égal à celui de l'eau, c'est-à-dire à $\frac{4}{3}$.

444. Détermination algébrique des points cardinaux d'un système centré. — La détermination algébrique des points et, par suite, des plans cardinaux d'un système centré permet non seulement, comme les constructions géométriques que nous venons d'exposer, de trouver les positions de ces points et de ces plans, mais conduit encore à établir, entre les positions des foyers conjugués et entre les grandeurs d'un objet et de son image, des relations absolument analogues à celles que nous avons précédemment établies pour un dioptrie simple. Nous ne pouvons, dans cet ouvrage, exposer en entier les calculs qui permettent de déterminer ces points et d'arriver à ces relations. Mais nous ferons du moins connaître sommairement la méthode algébrique la plus simple, celle de Monoyer, qui conduit à ces divers résultats.

Considérons le système centré, formé de trois dioptries, que nous avons représenté sur la figure 294 de la page 610, et soient :

A_1, C_1, F_1, F'_1 , le sommet, le centre de courbure et les foyers principaux du premier dioptrie du système ;

A_2, C_2, F_2, F'_2 et A_3, C_3, F_3, F'_3 les points analogues du second et du troisième dioptrie.

Soient encore : Q le point de concours des rayons incidents ;

Q₁ le point de concours des rayons réfractés par le premier dioptré ;

Q₂ et Q₃ les points de concours de ces mêmes rayons après leur réfraction à travers le second, puis à travers le troisième dioptré (les points Q, Q₁, Q₂, Q₃ ne sont pas marqués sur la figure 294).

$$\begin{array}{lll} \text{Posons : } A_1F_1 = f_1 & A_2F_2 = f_2 & A_3F_3 = f_3 \\ A_1F'_1 = f'_1 & A_2F'_2 = f'_2 & A_3F'_3 = f'_3 \\ QF_1 = q_1 & Q_1F_2 = q_2 & Q_2F_3 = q_3 \\ Q_1F'_1 = q'_1 & Q_2F'_2 = q'_2 & Q_3F'_3 = q'_3 \\ F'_1F_2 = \delta_1 & F'_2F_3 = \delta_2 & \end{array}$$

Pour déterminer la position relative des foyers conjugués, il faut établir une relation entre q₁, qui fait connaître la position du point de concours des rayons incidents, et q'₃ qui donne la position du point de concours des rayons émergents du système.

Or, la réfraction à travers le premier dioptré donne :

$$q_1q'_1 = f_1f'_1, \quad \text{d'où : } q'_1 = \frac{f_1f'_1}{q_1}. \quad (1)$$

De même, la réfraction à travers le second dioptré donne :

$$q_2q'_2 = f_2f'_2, \quad \text{d'où : } q'_2 = \frac{f_2f'_2}{q_2}. \quad (2)$$

Mais, en marquant les points Q, Q₁, Q₂ sur la figure 294, on voit immédiatement que l'on a :

$$\delta_1 = q'_1 + q_2, \quad \text{d'où : } q_2 = \delta_1 - q'_1. \quad (3)$$

Cette dernière formule est d'ailleurs générale si l'on tient compte des conventions de signes relatives à q'₁ et à q₂ (§ 428) et si l'on convient de regarder δ₁ comme positif ou négatif, suivant qu'il est compté, à partir de F'₁, du côté d'où ne vient pas la lumière, comme sur la figure 294, ou en sens inverse.

Si, dans la formule (3), on remplace q'₁ par sa valeur donnée par (1), puis que l'on porte la valeur de q₂ ainsi obtenue dans (2), il vient :

$$q'_2 = \frac{f_2f'_2}{\delta_1 - \frac{f_1f'_1}{q_1}}$$

La réfraction à travers le troisième dioptre donne :

$$q_3 q'_3 = f_3 f'_3, \quad \text{d'où :} \quad q'_3 = \frac{f_3 f'_3}{q_3}. \quad (4)$$

Mais on a immédiatement, sur la figure :

$$q_3 = \delta_2 - q'_2 = \delta_2 - \frac{f_2 f'_2}{\delta_1 - \frac{f_1 f'_1}{q_1}},$$

et cette formule est encore générale en faisant pour δ_2 des conventions de signes analogues à celles que nous avons indiquées relativement à δ_1 . En portant cette valeur de q_3 dans (4), nous aurons enfin la relation cherchée entre q_1 et q'_3 :

$$q'_3 = \frac{f_3 f'_3}{\delta_2 - \frac{f_2 f'_2}{\delta_1 - \frac{f_1 f'_1}{q_1}}}. \quad (5)$$

On traiterait de la même manière le cas où le système centré serait constitué par plus de trois dioptres simples.

Pour avoir la position du second foyer du système, il suffit évidemment de faire $q_1 = \infty$ dans la formule (5) et d'en déduire la valeur correspondante de q'_3 ; cette valeur donne la distance $F'_3 \Phi'$ (fig. 294). Pour avoir la position du premier foyer du système, il suffit de même d'exprimer, dans la même formule (5), que $q'_3 = \infty$, c'est-à-dire d'égaliser à 0 le dénominateur du second membre et de tirer q_1 de cette égalité; on obtient ainsi la valeur de la distance $F_1 \Phi$ (fig. 294).

443. Points principaux et points antiprincipaux. — Pour pouvoir déterminer la position de ces points, il faut chercher d'abord les relations qui donnent le rapport de grandeur de l'image et de l'objet dans un système centré. Ces relations une fois connues, il sera facile d'en déduire les valeurs de q_1 et de q'_1 pour lesquelles l'image sera égale à l'objet. Ces valeurs feront d'ailleurs connaître les positions des points principaux ou des points antiprincipaux, suivant qu'elles correspondront au cas où l'image est droite ou à celui où elle est renversée.

Soient donc :

y la grandeur d'un objet linéaire perpendiculaire à l'axe du système;

y' la grandeur de l'image donnée par la réfraction à travers le premier dioptré;

y'' et y''' les grandeurs des images qui résultent de la réfraction à travers le second, puis à travers le troisième dioptré.

En appliquant successivement à chaque dioptré du système les valeurs du rapport $\frac{y'}{y}$ trouvées plus haut (§ 433) et remarquant que les images successives jouent le rôle d'objet, l'une par rapport à la seconde surface réfringente, l'autre par rapport à la troisième, on a :

$$\begin{aligned} \frac{y'}{y} &= \frac{f_1}{q_1} = \frac{q'_1}{f'_1}, \\ \frac{y''}{y'} &= \frac{f_2}{q_2} = \frac{q'_2}{f'_2}, \\ \frac{y'''}{y''} &= \frac{f_3}{q_3} = \frac{q'_3}{f'_3}, \end{aligned}$$

En multipliant ces égalités membre à membre et simplifiant, il vient :

$$\frac{y'''}{y} = \frac{f_1 f_2 f_3}{q_1 q_2 q_3} = \frac{q'_1 q'_2 q'_3}{f'_1 f'_2 f'_3}.$$

Au moyen de la formule des foyers conjugués considérée successivement pour chacun des dioptrés composants, on peut d'ailleurs faire disparaître, de chacune des deux expressions du rapport $\frac{y'''}{y}$, les quantités q_2 et q_3 , q'_1 et q'_2 , de manière que ces expressions contiennent, en outre des distances focales supposées connues, l'une, seulement q_1 , l'autre, seulement q'_3 .

Des considérations simples permettent en outre d'établir : 1° que si le nombre des dioptrés simples composants est impair, l'image est droite ou renversée par rapport à l'objet, suivant que le rapport $\frac{y'''}{y}$ est négatif ou positif; 2° que si le nombre des dioptrés composants est pair au contraire, l'image est droite ou renversée par rapport à l'objet, suivant que le rapport $\frac{y'''}{y}$ est positif ou négatif.

Considérons dès lors, en particulier, le cas de trois dioptrés associés, et posons :

$$\frac{f_1 f_2 f_3}{q_1 q_2 q_3} = \pm 1 \quad \text{et} \quad \frac{q'_1 q'_2 q'_3}{f'_1 f'_2 f'_3} = \pm 1.$$

Si, après avoir éliminé q_2 et q_3 , q'_1 et q'_2 par le procédé indiqué ci-dessus, nous tirons de ces égalités les valeurs de q_1 et de q'_3 , elles nous feront connaître les positions de deux couples de foyers conjugués tels que l'image et l'objet, de même grandeur, sont d'ailleurs de même sens ou de sens inverse, suivant que le rapport $\frac{y'''}{y}$ aura été fait égal à $+1$ ou à -1 .

Ces couples de foyers conjugués seront donc les points principaux et antiprincipaux que nous cherchons.

Quant aux points nodaux, nous savons qu'il suffit, pour les obtenir, de porter à partir de Φ et de Φ' des longueurs respectivement égales à $\Phi'H'$ et à ΦH , en sens inverse du sens dans lequel ces longueurs se présentent elles-mêmes sur la figure.

446. Formules des systèmes centrés. — Au moyen de calculs que nous ne pouvons reproduire ici, on démontre que si l'on représente :

par p la distance d'un point lumineux au premier point principal H ,

par p' la distance du foyer conjugué au deuxième point principal H' ,

par φ la distance du premier foyer principal au premier point principal,

par φ' la distance du second foyer principal au second point principal, la formule (5) de la page 618 peut toujours se mettre, quel que soit le nombre des dioptries simples composants, sous la forme :

$$\frac{\varphi}{p} + \frac{\varphi'}{p'} = 1, \quad (1)$$

absolument analogue à celle de la formule que nous avons établie pour les dioptries simples.

Il résulte évidemment de là que, si les positions des foyers conjugués sont rapportées, non plus aux points principaux, mais aux foyers principaux du système, et si l'on représente par q et q' les distances de deux foyers conjugués aux foyers principaux correspondants, la formule précédente pourra se mettre sous la forme :

$$qq' = \varphi\varphi'. \quad (2)$$

Ces formules (1) et (2) sont d'ailleurs générales à la condition de faire, quant aux signes de p , p' , q , q' , φ , φ' , des conventions analogues à celles dont il a été question pour les dioptries simples.

La discussion de l'une ou de l'autre de ces formules ferait connaître les positions successives du foyer conjugué d'un point lumineux qui se déplace depuis $+\infty$ jusqu'à $-\infty$.

447. **Distances focales des systèmes centrés. Systèmes équi-focaux et inéquifocaux.** — L'analogie des formules (1) et (2) avec les formules des dioptrés simples conduit à donner aux distances φ et φ' , définies dans le paragraphe précédent, les noms de *première* et de *seconde distance focale*. On démontre d'ailleurs que le rapport de ces distances focales φ' et φ est égal, dans tout système centré, à l'indice du dernier milieu par rapport au premier, ou au rapport des indices absolus m_n et m_o du dernier et du premier milieu, de telle sorte que l'on a :

$$\frac{\varphi'}{\varphi} = \frac{m_n}{m_o}.$$

Les distances focales φ' et φ seront donc égales ou inégales suivant que les indices des milieux extrêmes seront égaux ou inégaux. De là la distinction de deux grandes classes de systèmes centrés : les *systèmes équifocaux* ou à distances focales égales, et les *systèmes inéquifocaux* ou à distances focales inégales.

Il faut remarquer que, dans les systèmes équifocaux, les points nodaux se confondent avec les points principaux correspondants ; on a en effet (fig. 297) pour de tels systèmes :

$$\begin{aligned} \Phi N &= \Phi' H' = \varphi' = \varphi = \Phi H \\ \Phi' N' &= \Phi H = \varphi = \varphi' = \Phi' H'. \end{aligned}$$

Les lentilles, les microscopes, les lunettes terrestres et astronomiques, etc., sont des systèmes équifocaux. L'œil humain est au contraire un système inéquifocal ; l'indice du dernier milieu traversé par la lumière, le corps vitré, est en effet différent de celui de l'air qui constitue le premier milieu, aussi commet-on une grossière erreur lorsque, en vue d'une simplification, on substitue au système inéquifocal de l'œil humain, le système équifocal constitué par une lentille convergente.

448. **Rapport de grandeur de l'image et de l'objet.** — Si l'on se reporte à la figure 297 relative à la construction des images et que l'on pose $PQ = y$, $P'Q' = y'$, $Q\Phi = q$, $Q'\Phi' = q'$, les triangles $PQ\Phi$ et $KH\Phi$, $P'Q'\Phi'$ et $I'H'\Phi'$ donnent, en remarquant que $KH = P'Q'$ et que $I'H' = PQ$:

$$\frac{y'}{y} = \frac{\varphi}{q} = \frac{q'}{\varphi},$$

relations analogues encore à celles que nous avons établies pour les dioptries simples.

Ce rapport $\frac{y'}{y}$ pourrait également être exprimé en fonction de p et de p' .

C. — LENTILLES.

449. **Lentilles sphériques.** — Les lentilles sphériques sont des systèmes centrés constitués par l'association de deux dioptries sphériques simples. Dans toutes les circonstances où les médecins ont à considérer des lentilles, soit qu'il s'agisse des lentilles en verre qui sont employées pour la construction des instruments d'optique ou pour la correction des anomalies de la vision, soit qu'il s'agisse de la lentille oculaire, le premier et le dernier milieu traversés par la lumière (air et air dans le premier cas, humeur aqueuse et corps vitré dans le second) ont toujours même indice et les distances focales sont dès lors toujours égales. Par suite nous n'étudierons la réfraction à travers les lentilles qu'en tant qu'elles constituent des systèmes équifocaux.

Tout ce que nous avons dit dans les paragraphes précédents relativement à la construction des points focaux, principaux et nodaux, à la détermination de ces mêmes points par le calcul, à la construction des rayons réfractés et des images, etc., s'applique du reste sans aucun changement aux lentilles.

Toutefois, de l'égalité des deux distances focales φ et φ' résultent quelques simplifications qui sont particulières à tous les systèmes équifocaux.

Les points nodaux, par exemple, coïncident avec les points principaux correspondants, comme nous l'avons déjà fait remarquer (§ 447), et les formules générales (1) et (2) de la page 620 deviennent, dans ce cas particulier :

$$\frac{\varphi}{p} + \frac{\varphi}{p} = 1,$$

ou

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p} = \frac{1}{\varphi},$$

et

$$qq' = \varphi^2.$$

450. **Centre optique.** — Il existe dans les lentilles un point remarquable appelé *centre optique*. Lorsque l'épaisseur de la lentille est négligeable, condition que l'on peut regarder comme réalisée par les lentilles qui constituent les divers instruments d'optique et

par celles que l'on emploie en Ophtalmologie, le centre optique joue, en effet, un rôle important dans l'étude de la réfraction; aussi allons-nous indiquer la position et les propriétés de ce point. Le centre optique est un point R de l'axe (fig. 298) tel que tout rayon qui, dans son trajet LL' à l'intérieur de la lentille, passe par ce point, sort de la lentille avec une direction L'T parallèle à sa direction d'entrée VL.

Pour déterminer ce centre optique, il suffit de mener par les centres de courbure E et E' des deux faces de la lentille des rayons EL, E'L' parallèles entre eux; l'intersection R de la droite LL' et

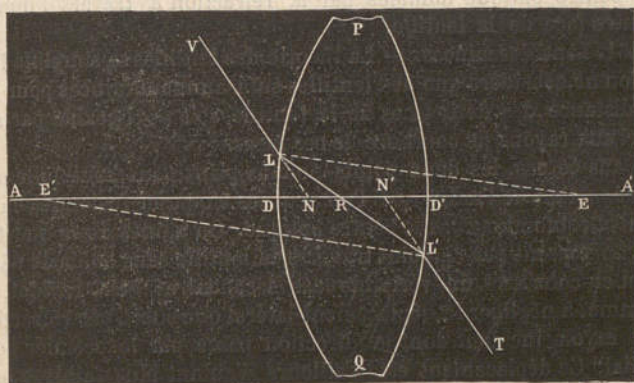


Fig. 298. — Centre optique et points nodaux-principaux dans les lentilles.

de l'axe AA' est le centre optique cherché. En effet, soit VL le rayon incident qui se réfracte suivant LL'; les plans tangents en L et L' étant parallèles, puisqu'ils sont respectivement perpendiculaires aux rayons parallèles EL et E'L', la réfraction en L et en L' a lieu comme à travers une lame de verre à faces parallèles; donc le rayon émergent L'T sera parallèle au rayon incident VL.

Le point R est d'ailleurs fixe, quels que soient les rayons EL, E'L' au moyen desquels on le détermine. En effet, les triangles semblables ERL, E'RL' donnent :

$$\frac{ER}{E'R} = \frac{EL}{E'L'},$$

ce qui montre que le centre optique R est le point qui divise la dis-

tance des centres de courbure E et E' des deux faces de la lentille en parties proportionnelles aux rayons de ces faces.

Le rayon incident VL et le rayon réfracté correspondant L'T étant parallèles, si on les prolonge l'un et l'autre jusqu'à leur rencontre avec l'axe, les points N et N' ainsi obtenus sont en même temps les points nodaux et les points principaux de la lentille. Si l'on remarque, en outre, que les rayons qui se propageraient suivant RL ou suivant RL' se réfracteraient suivant LV ou suivant L'T, on conclut que :

Les points nodaux-principaux d'une lentille sont les images du centre optique données par la réfraction à travers l'une et l'autre face de la lentille.

451. **Lentilles minces.** — La théorie des lentilles se simplifie lorsqu'on ne considère que des lentilles suffisamment minces pour que la distance des deux faces de la lentille soit négligeable par rapport aux rayons de courbure de ces faces.

Dans ce cas, les deux points nodaux-principaux sont tellement voisins l'un de l'autre que l'on peut les supposer fusionnés en un seul et confondus avec le centre optique. On admet alors que tout rayon passant par ce point traverse la lentille sans subir de déviation et constitue un véritable axe secondaire; cela revient, en somme, à négliger le déplacement latéral que subit, par réfraction, un rayon incident dont la direction passe par le premier point nodal. Ce déplacement est d'ailleurs d'autant plus faible que le rayon est moins incliné sur l'axe principal et que la lentille est plus mince.

La fusion des points nodaux-principaux entraîne évidemment celle des plans principaux.

452. **Formules des lentilles minces.** — Pour établir cette formule, il faut considérer successivement la réfraction à travers chacun des dioptries simples qui constituent la première et la seconde face de la lentille.

Soient donc p la distance d'un point lumineux P à la lentille, p_1 la distance du foyer conjugué P₁ donné par la réfraction à travers la première face dont nous représenterons le rayon de courbure par R, et soit n l'indice de la substance par laquelle la lentille est constituée. On sait que l'on a (§ 423) :

$$\frac{1}{p} + \frac{n}{p_1} = \frac{n-1}{R}. \quad (1)$$

Le foyer conjugué P_1 joue maintenant le rôle d'objet dans la réfraction à travers la seconde face et sa distance à cette face est encore p_1 , puisque nous supposons négligeable l'épaisseur de la lentille. Mais les conventions de signes faites relativement à la distance d'une image à un dioptré simple sont exactement inverses de celles qui concernent les signes des distances de l'objet. Par suite la distance p_1 , lors de la réfraction à travers la seconde face doit toujours être de signe contraire à celui qu'elle a dans la réfraction à travers la première face; on devra donc, pour cette raison, l'affecter du signe — lorsqu'on lui fait représenter la distance de P_1 à la seconde face de la lentille. Par conséquent, si R' est le rayon de courbure de cette face et p' la distance du foyer conjugué de P_1 après réfraction à travers cette même face de la lentille, on aura (§ 425) :

$$\frac{1}{-p_1} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{R'} - 1,$$

ou

$$-\frac{n}{p_1} + \frac{1}{p} = -\frac{n-1}{R'}. \quad (2)$$

En ajoutant membre à membre les équations (1) et (2), il vient :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = (n-1) \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R'} \right). \quad (3)$$

Pour établir cette relation, nous n'avons fait aucune hypothèse sur la courbure des faces de la lentille; par suite, la formule (3), qui établit une relation entre les distances p et p' de deux foyers conjugués quelconques de cette lentille et les éléments caractéristiques n , R et R' , est générale. Il suffira donc de donner à n des valeurs plus grandes ou plus petites que l'unité, à R et à R' , des valeurs positives ou négatives, finies ou infinies pour avoir les formules correspondant à tous les cas qui peuvent être réalisés.

453. **Distances focales. Plans focaux.** — Pour obtenir les foyers principaux et les distances focales, il suffit de faire successivement $p' = \infty$ et $p = \infty$ dans la formule (3) du paragraphe précédent et de tirer les valeurs correspondantes de p et de p' . On obtient ainsi :

pour $p' = \infty$,

$$p = \frac{1}{(n-1) \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R'} \right)} = f, \quad (4)$$

pour $p = \infty$,
$$p' = \frac{1}{(n-1)\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R'}\right)} = f = f.$$

Les distances focales sont donc toujours égales entre elles et les foyers principaux sont, dans tous les cas, à la même distance de la lentille, quels que soient les rayons de courbure et le sens de la convexité de chacune des faces de la lentille.

Au moyen de considérations analogues à celles que nous avons présentées au moment de l'étude des miroirs sphériques et des dioptries simples, on établirait, pour les plans menés par les points focaux perpendiculairement à l'axe principal d'une lentille, ou *plans focaux*, des propriétés identiques à celles des plans focaux des dioptries simples, le centre optique jouant le rôle du centre de courbure de ces dioptries.

454. **Diverses espèces de lentilles sphériques.** — Suivant que f est positif ou négatif, les deux foyers sont réels ou virtuels et la lentille est dite *convergente* ou *divergente* (1).

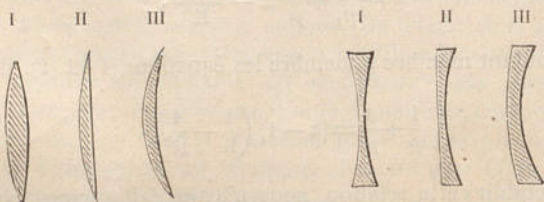


Fig. 299. — Diverses espèces de lentilles sphériques convergentes.

Fig. 300. — Diverses espèces de lentilles sphériques divergentes.

Le signe de f dépend du reste, comme le montre la formule (4), des signes de $(n-1)$ et de $\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R'}\right)$.

Dans le cas ordinaire où $n > 1$, f est positif et la lentille est convergente si l'on a :

	$R > 0$ et $R' < 0$	Lentille biconvexe (fig. 299, I),
ou	$R > 0$ et $R' = \infty$	Lentille planoconvexe (fig. 299, II),
ou	$R' > R > 0$	Ménisque convergent (fig. 299, III);

(1) Par suite des conventions de signes, dans le cas où f est positif, le premier foyer F est du côté de la lumière incidente, le second foyer F' est situé de l'autre côté; c'est l'inverse dans le cas où f est négatif.

f est au contraire négatif et la lentille est divergente si l'on a :

- $R < 0$ et $R' > 0$ Lentille biconcave (fig. 300, I),
- ou $R = \infty$ et $R' > 0$ Lentille plan-concave (fig. 300, II),
- ou $R > R' > 0$ Ménisque divergent (fig. 300, III).

On arriverait à des conclusions inverses dans le cas de $n < 1$.

Lorsque $n > 1$, les lentilles convergentes présentent ce caractère commun qu'elles ont les bords plus minces que le milieu ; c'est le contraire pour les lentilles divergentes.

455. **Formules des lentilles.** — Si l'on substitue à l'expression $(n-1)\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R'}\right)$ sa valeur $\frac{1}{f}$, il vient, pour la formule générale des lentilles :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f} \quad (I)$$

Dans le cas des lentilles divergentes, il est commode, pour la discussion, de mettre en évidence le signe négatif de f , on a donc : pour les lentilles convergentes :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f} \quad (II)$$

et pour les lentilles divergentes :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f}, \quad (II')$$

f représentant la valeur absolue de la distance focale.

Ces formules peuvent aussi se mettre sous la forme :

$$\frac{f}{p} + \frac{f}{p'} = 1 \quad (III) \qquad \frac{f}{p} + \frac{f}{p'} = -1 \quad (III')$$

Si l'on désigne par q et q' les distances de l'objet et de son image au foyer principal correspondant, la formule générale prend la forme simplifiée :

$$qq' = f^2 \quad (IV)$$

qui s'applique aux deux espèces de lentilles convergentes et divergentes.

456. **Construction géométrique du rayon réfracté correspondant à un rayon incident quelconque.** — Soit une lentille quel-

conque (fig. 301, lentille convergente et fig. 302, lentille divergente) représentée par ses deux plans principaux fusionnés au centre optique C et par ses deux plans focaux F et F' .

Pour trouver le rayon réfracté correspondant à un rayon incident quelconque SI , menons l'axe secondaire NC passant par le point N où la direction du rayon SI coupe le premier plan focal; le rayon réfracté correspondant sera, d'après la propriété du premier plan focal, la droite IT menée par le point d'incidence I parallèlement à cet axe secondaire.

On peut encore mener l'axe secondaire CN' parallèle au rayon

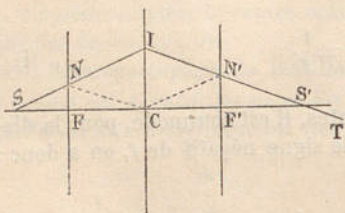


Fig. 301. — Lentille convergente; construction géométrique du rayon réfracté correspondant à un rayon incident quelconque.

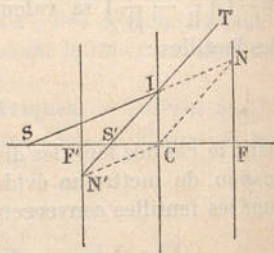


Fig. 302. — Lentille divergente; construction géométrique du rayon réfracté correspondant à un rayon incident quelconque.

incident; d'après la propriété du second plan focal, il suffit, pour avoir la direction du rayon réfracté, de joindre le point N' , où cet axe rencontre le second plan focal, au point I .

Ces constructions sont identiques à celles que nous avons indiquées à propos des systèmes centrés (§ 442), sauf les simplifications qui résultent du fusionnement des points nodaux et des plans principaux.

Les constructions précédentes permettent de trouver le foyer conjugué S' d'un point S situé sur l'axe principal.

457. Image d'un point situé hors de l'axe principal. Image d'un objet. Relations de dimensions de l'image et de l'objet. — Soit P (fig. 303 lent. conv. et fig. 304 lent. div.) un point situé hors de l'axe; l'image de P se fera sur l'axe secondaire PC passant par ce point, puisque l'on peut admettre que le rayon dirigé suivant cet axe n'est pas dévié par son passage à travers la lentille. Considérons, d'autre part, un rayon incident PI issu de P et parallèle à

l'axe principal; la direction du rayon réfracté correspondant devra passer par le second foyer principal F' . Le point P' d'intersection de ce rayon réfracté IF' (fig. 303), ou de son prolongement (fig. 304), avec l'axe secondaire PC , sera l'image de P .

On peut encore, pour déterminer la position de P' sur l'axe PC , considérer un rayon incident PE issu de P et dont la direction passe par le premier foyer principal F ; le rayon réfracté correspondant sera la parallèle menée par E à l'axe principal. Le point P'

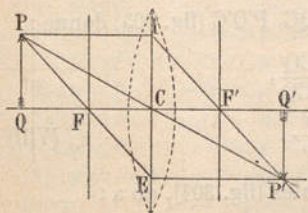


Fig. 303. — Lentille convergente; image d'un point situé en dehors de l'axe principal, image d'une droite perpendiculaire à l'axe.

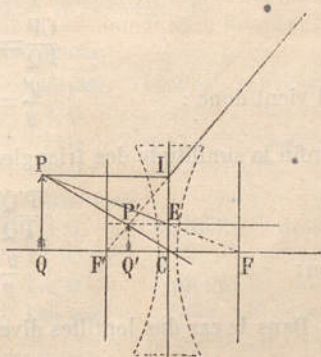


Fig. 304. — Lentille divergente; image d'un point situé en dehors de l'axe principal; image d'une droite perpendiculaire à l'axe.

d'intersection de ce rayon (fig. 303), ou de son prolongement (fig. 304), avec PC sera encore l'image de P .

L'image d'une droite PQ perpendiculaire à l'axe principal de la lentille sera d'ailleurs la droite $P'Q'$ également perpendiculaire à cet axe.

Les figures 303 et 304 conduisent immédiatement aux relations qui existent entre les dimensions linéaires y et y' de l'objet et de son image. Si l'on remarque, en effet, que $EC = P'Q' = y'$ comme parallèles comprises entre parallèles, les triangles semblables PQF , ECF donnent :

$$\frac{EC}{PQ} = \frac{CF}{FQ}, \tag{1}$$

ou :

$$\frac{y'}{y} = \pm \frac{f}{q} \tag{V) et (V')}$$

En tenant compte de la formule $qq' = f^2$, on a encore :

$$\frac{y'}{y} = \pm \frac{q'}{f}, \quad (\text{VI}) \text{ et } (\text{VI}')$$

relations qui peuvent du reste se déduire directement des figures 303 et 304.

On peut trouver d'autres formes de la valeur du rapport $\frac{y'}{y}$. En effet, dans le cas des lentilles convergentes (fig. 303), on a :

$$\frac{CF}{FQ} = \frac{CF}{CQ - CF},$$

il vient donc :

$$\frac{y'}{y} = \frac{f}{p - f}; \quad (\text{VII})$$

enfin la similitude des triangles PQC, P'Q'C (fig. 303) donne :

$$\frac{P'Q'}{PQ} = \frac{CQ'}{CQ},$$

ou :

$$\frac{y'}{y} = \frac{p'}{p}. \quad (\text{VIII})$$

Dans le cas des lentilles divergentes (fig. 304), on a :

$$\frac{CF}{FQ} = \frac{CF}{CQ + CF};$$

il vient donc, en remarquant que la relation (1) a été établie pour les valeurs absolues des longueurs qui y entrent :

$$\frac{y'}{y} = \frac{-f}{p - f}. \quad (\text{VII}')$$

On a encore, comme pour les lentilles convergentes :

$$\frac{P'Q'}{PQ} = \frac{CQ'}{CQ},$$

ou :

$$\frac{y'}{y} = -\frac{p'}{p} \quad (1). \quad (\text{VIII}')$$

Si l'on met en évidence le signe négatif de f , on aura :

$$\frac{y'}{y} = \frac{f}{p + f} \quad \text{et} \quad \frac{y'}{y} = -\frac{p'}{p}.$$

(1) Voir pour l'explication du signe — des formules (V'), (VI'), (VII') et (VIII') la note de la page 561.

458. **Discussion des formules des lentilles.** — La discussion des formules :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \pm \frac{1}{f} \quad \text{et} \quad \frac{y'}{y} = \pm \frac{p'}{p}$$

se fait comme celle des formules correspondantes des miroirs et des dioptrés sphériques.

Les tableaux suivants, dans lesquels I représente l'image et O l'objet, contiennent les résultats de cette discussion pour toutes les valeurs de p , comprises entre $+\infty$ et $-\infty$ (1).

Lentilles convergentes.

$p = +\infty$	$p' = f'$	I très petite,	réelle,	renversée.
$+\infty > p > 2f$	$f' < p' < 2f'$	$I < 0$	—	—
$p = 2f$	$p' = 2f'$	$I = 0$	—	—
$f < p < 2f$	$+\infty > p' > 2f'$	$I > 0$	—	—
$p = f$	$p' = \pm \infty$	I infini ¹ grande.		
$0 < p < f$	$-\infty < p' < 0$	$I > 0$	virtuelle,	droite.
$p = 0$	$p' = 0$	$I = 0$		—
$-\infty < p < 0$	$0 < p' < f'$	$I < 0$	réelle,	—
$p = -\infty$	$p' = f'$	I très petite,	—	—

Lentilles divergentes.

$p = +\infty$	$p' = -f'$	I très petite,	virtuelle,	droite.
$+\infty > p > 0$	$-f' < p' < 0$	$I < 0$	—	—
$p = 0$	$p' = 0$	$I = 0$		—
$-f < p < 0$	$+\infty > p' > 0$	$I > 0$	réelle,	—
$p = -f$	$p' = \pm \infty$	I infini ¹ grande.		
$-2f < p < -f$	$-\infty < p' < -2f'$	$I > 0$	virtuelle,	renversée.
$p = -2f$	$p' = -2f'$	$I = 0$	—	—
$-\infty < p < -2f$	$-2f' < p' < -f'$	$I < 0$	—	—
$p = -\infty$	$p' = -f'$	I très petite,	—	—

On peut encore, comme nous l'avons fait déjà pour les miroirs sphériques et pour les dioptrés simples, schématiser par une figure l'ensemble des résultats relatifs aux grandeurs de l'image et de l'objet, à leurs positions et à leur état de réalité ou de virtualité. C'est ce qui a été fait sur les planches III et IV relatives, la première à une

(1) Il faut, pour comprendre ces tableaux, se rappeler que par suite des conventions de signes inverses qui ont été faites pour p et p' , les valeurs négatives de p' correspondent au même côté de la lentille que les valeurs positives de p et inversement.

lentille convergente, la seconde à une lentille divergente. On y a supposé qu'un objet de grandeur constante occupe successivement diverses positions 1, 2, 3... en avant et en arrière de la lentille et on a chaque fois construit l'image correspondante 1', 2', 3'...; on voit que, la grandeur de l'objet étant constante, l'image est toujours comprise entre l'axe principal et la droite 5'... 3' (planche III), ou 6'... 8' (planche IV), à laquelle, comme dans le cas des miroirs sphériques et des dioptrés simples, Gariel a donné le nom de *caractéristique* de l'image par rapport à la lentille.

Il résulte tout d'abord de l'inspection des planches III et IV que l'image et l'objet se déplacent toujours dans le même sens.

En outre, il existe encore quatre couples de régions conjuguées marquées, pour l'objet, par des accolades rouge, verte, jaune et bleue et par des numéros en haut de la figure, pour l'image, par des accolades de même couleur et par les mêmes numéros accentués en bas de la figure. Les régions conjuguées sont donc I et I', II et II', III et III', IV et IV'. Les points F et F', H et H' sont d'ailleurs les points focaux et antiprincipaux. Dans chacune des régions I, II, III, IV l'objet a été figuré par des traits de couleurs différentes, rouge, vert, jaune, bleu et les images correspondantes des régions I', II', III', IV', ont été représentées par des traits de même couleur.

Les objets et les images situés à la limite de deux régions contiguës ont été figurés par deux traits contigus dont les couleurs sont celles de ces régions; tel est le cas par exemple de l'objet 2 et de l'image 2' (planche III).

En outre, les diverses portions de la droite 4... 10 qui limite l'objet ont été tracées en traits dont la couleur est celle des objets correspondants et il en est de même de la droite 5'... 3' (planche III), ou 6'... 8' (planche IV), caractéristique de l'image.

L'objet et l'image ont d'ailleurs été figurés par des traits continus ou discontinus suivant qu'ils sont réels ou virtuels.

459. **Détermination de la distance focale des lentilles.** — On peut calculer cette distance après avoir mesuré, avec un sphéromètre, les rayons de courbure R et R' de la lentille, et avoir déterminé son indice de réfraction n sur un prisme taillé dans la même substance; la formule :

$$f = \frac{RR'}{(n-1)(R'-R)},$$

permet alors de calculer f.

La distance f peut d'ailleurs être déterminée plus facilement, et souvent avec plus d'exactitude, en opérant comme suit :

1° *Lentilles convergentes. a.* — On reçoit sur la lentille un faisceau de rayons parallèles (rayons solaires par exemple) dont l'axe coïncide avec l'axe principal de la lentille et l'on cherche avec un écran le sommet du cône réfracté. La distance de l'écran à la lentille fait connaître la distance focale cherchée.

b. — On place devant la lentille, et sur l'axe principal, un petit objet lumineux, on cherche avec un écran la position de l'image de cet objet, et l'on mesure les distances p et p' de l'objet et de l'écran à la lentille; la formule $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$ permet de calculer f lorsque p et p' ont été ainsi déterminés.

c. — On prend comme objet et comme écran deux petites lames translucides sur lesquelles sont tracées des divisions égales et que l'on dispose, perpendiculairement à l'axe, de part et d'autre de la lentille, à la même distance de celle-ci. La plaque objet étant alors éclairée par la lumière d'une source quelconque, on déplace simultanément l'objet et l'écran de quantités égales, dans des sens opposés, jusqu'à ce que l'image renversée des divisions de l'objet coïncide exactement avec les divisions de la plaque écran. L'objet et l'écran sont à ce moment dans les deux plans antiprincipaux, et la distance de chacun d'eux à la lentille est égale au double de la distance focale f de la lentille.

2° *Lentilles divergentes. a.* — On recouvre l'une des faces de la lentille d'un écran opaque percé de deux ouvertures situées de part et d'autres de l'axe principal à une distance $AB = d$ (fig. 305) l'une de l'autre. On reçoit alors, sur la face de la lentille ainsi recouverte, un faisceau de lumière (lumière solaire par exemple) parallèle à l'axe principal, et l'on cherche la position qu'il faut donner à un écran, situé derrière la lentille, pour que la distance des taches lumineuses a et b , que viennent faire sur cet écran les rayons qui ont traversé les ouvertures A et B, soit égale à $2d$ ou à $3d$ par

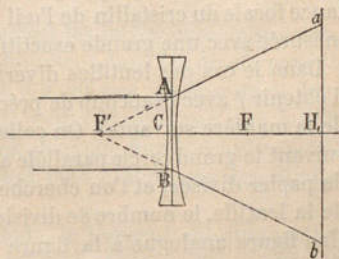


Fig. 305. — Détermination de la distance focale d'une lentille divergente.

exemple; la distance de l'écran à la lentille est alors égale à f ou à $2f$, ainsi qu'il est facile de s'en rendre compte sur la figure.

b. — On prend comme objet une image fournie par une lentille convergente, on interpose la lentille divergente, sur le trajet du faisceau qui irait former cette image, à une distance p en avant de celle-ci, et l'on cherche, avec un écran, la position de l'image réelle que donne, dans ces conditions, la lentille divergente. Si l'on mesure la distance p' de cette image à cette lentille, la formule $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$ permet de calculer f , en remarquant toutefois que la distance p est ici négative, puisque l'objet (image fournie par la lentille convergente) est ici virtuel.

c. — On place un objet de diamètre connu y , d'un côté de la lentille, sur l'axe principal, perpendiculairement à cet axe, et l'on mesure la dimension y' du diamètre correspondant de l'image virtuelle que l'on aperçoit en se plaçant de l'autre côté de la lentille, sur l'axe principal. La formule :

$$\frac{y'}{y} = \frac{f}{p+f},$$

d'où l'on tire :

$$f = \frac{py'}{y-y'},$$

permet alors de déterminer f .

Cette méthode, qui est également applicable aux lentilles convergentes, a été employée par Helmholtz pour déterminer la distance focale du cristallin de l'œil humain; la valeur de y' était alors mesurée avec une grande exactitude au moyen de l'ophtalmomètre.

Dans le cas des lentilles divergentes et lorsqu'on n'a pas besoin d'obtenir f avec beaucoup de précision, on détermine la valeur de y' de la manière suivante. On colle sur l'une des faces de la lentille, suivant le grand cercle parallèle au diamètre à mesurer y , une bande de papier divisée, et l'on cherche, en se plaçant suffisamment loin de la lentille, le nombre de divisions n que paraît recouvrir l'image. Une figure analogue à la figure 268, p. 568, relative aux miroirs convexes, montrerait que ce nombre n est sensiblement égal à y' si l'œil observateur est assez éloigné de la lentille.

460. Numérotage des lentilles. — La correction des anomalies de la vision exige l'emploi d'un nombre considérable de lentilles de distances focales différentes; aussi les oculistes ont-ils, depuis

longtemps, reconnu la nécessité de caractériser chacune de ces lentilles par un numéro.

Les lentilles dont on fait usage en Oculistique étant presque toujours équiconvexes, le premier système de numérotage adopté consistait à donner pour numéro à une lentille la longueur, exprimée en pouces, du rayon de courbure commun à ses deux faces. Ce nombre exprimait en même temps, d'une façon approchée, la distance focale de la lentille. La distance focale d'une lentille équiconvexe, par exemple, est, en effet, donnée par la formule :

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R'} \right) = (n-1) \frac{2}{R},$$

puisque $R' = -R$.

Or les verres avec lesquels sont fabriquées les lentilles livrées aux oculistes et aux opticiens ont toujours un indice voisin de $\frac{3}{2}$; si l'on adopte cette valeur pour n , la formule précédente donne :

$$f = R,$$

ce qui indique que les foyers principaux coïncident avec les centres de courbure des faces de la lentille équiconvexe.

Dans le système de numérotage en pouces, les lentilles de nos 36, 20, 8, 3, 2... étaient donc des lentilles dont les rayons de courbure, communs aux deux faces, avaient respectivement 36, 20, 8, 3, 2... pouces et dont les distances focales devaient avoir sensiblement même longueur.

Ce système de numérotage présentait les inconvénients suivants : 1^o le pouce n'ayant pas la même longueur dans les divers pays (1), les lentilles de même numéro n'étaient pas identiques si leurs provenances étaient différentes ; 2^o l'effet produit par une lentille étant plus considérable lorsque sa distance focale est plus petite, la force d'une lentille était d'autant plus grande que son numéro était plus petit.

Pour supprimer ces inconvénients, le Congrès international de Médecine tenu à Bruxelles (2) en 1873 adopta les principes suivants pour base d'un nouveau système de numérotage :

(1) Le pouce des fabricants français vaut 2^{cm}.777, le pouce anglais 2^{cm}.540, le pouce rhénan 2^{cm}.274, etc.

(2) Une commission, chargée de préparer les bases du nouveau sys-

1° Le numéro d'une lentille sera donné, non plus par son rayon de courbure exprimé en pouces, mais par l'inverse $\frac{1}{f}$ de sa distance focale exprimée en prenant le mètre pour unité.

2° La première lentille de la nouvelle série, celle qui portera le numéro 1, sera la lentille dont la distance focale est de 1 mètre, car on a alors $\frac{1}{f} = \frac{1}{1} = 1$ (proposition Nagel).

3° Cette unité portera le nom de *dioptrie*; le quotient $\frac{1}{f}$ représentera donc, pour toute lentille, un certain nombre de *dioptries* (proposition Monoyer).

4° La nouvelle série des verres de lunettes sera constituée par des lentilles dont les distances focales seront respectivement égales à $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{5}$... de mètre ou à 0^m.50, 0^m.33, 0^m.25, 0^m.20...; leurs numéros seront donc :

$$\frac{1}{0.50} = 2 \text{ dioptries, } \quad \frac{1}{0.33} = 3 \text{ dioptries, } \quad \frac{1}{0.25} = 4 \text{ dioptries. .}$$

5° Comme on a souvent besoin, dans la pratique, de verres intermédiaires entre les précédents, on complétera la série par l'intercalation de lentilles dont les numéros seront égaux à des subdivisions décimales de l'unité ou de la *dioptrie*, c'est-à-dire dont les numéros seront égaux à un nombre entier de dixièmes ou de centièmes de dioptrie (proposition Monoyer).

C'est ainsi qu'ont été intercalés les verres dont les distances focales sont 4^m, 2^m, 1^m.33, 0^m.80.... et qui ont donc pour numéros :

$$\frac{1}{4} = 0^{\text{d}}.25, \quad \frac{1}{2} = 0^{\text{d}}.50, \quad \frac{1}{1.33} = 0^{\text{d}}.75, \quad \frac{1}{0.80} = 1^{\text{d}}.25...$$

Ajoutons que Monoyer a proposé en outre de donner au numéro

tème de numérotage des verres de lunettes, avait été nommée, sur la proposition de Javal, lors du congrès international de Médecine tenu à Paris en 1867; elle était composée de Javal et Giraud-Teulon (France), Nagel et Leber (Allemagne), Donders, rapporteur (Hollande), Sœlberg Wels (Angleterre), Quaglino (Italie), Otto Becker (Autriche).

$\frac{1}{f}$ d'une lentille le nom de *pouvoir dioptrique*, dont nous ferons usage dans la suite.

461. **Passage d'un système de numérotage à l'autre.** — Le système de numérotage en dioptries est aujourd'hui universellement employé par les oculistes; mais tous les opticiens ne le connais-

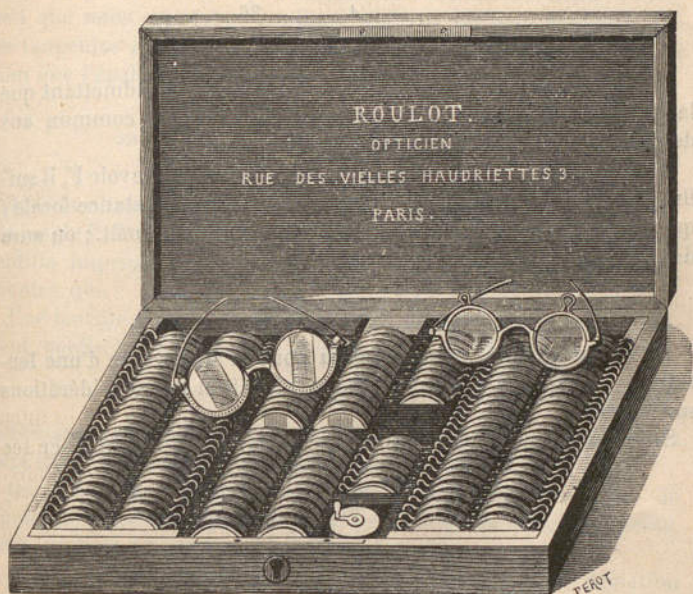


Fig. 306. — Boîte d'oculiste.

sent pas, et le médecin a donc souvent besoin de déterminer le numéro n en pouces d'un verre dont il connaît le numéro F en dioptries et réciproquement. A cet effet, en face de chacun des verres qui constituent les séries de lentilles composant les boîtes d'oculistes (fig. 306), on trouve généralement inscrits les deux numéros correspondant aux deux systèmes de numérotage.

Si l'on n'a pas cette double graduation à sa disposition, on détermine le numéro n en pouces qui correspond au numéro F en dioptries de la manière suivante :

La distance focale f du verre de numéro F est donnée par l'égalité :

$$\frac{1}{f} = F, \quad \text{d'où :} \quad f = \frac{1}{F};$$

f étant ainsi exprimée en mètres et le pouce valant $0^m.02777$, la mesure de f en pouces sera :

$$f_p = \frac{1}{F \times 0.02777} = \frac{36}{F}.$$

Cette valeur f_p sera le numéro n en pouces, en admettant que la distance focale soit égale au rayon de courbure commun aux deux faces de la lentille supposée équiconvexe.

Si l'on connaît n , au contraire, et que l'on veuille avoir F , il suffira de remarquer que le rayon de courbure, ou la distance focale f que nous supposons lui être égale, vaut $n \times 0.02777$ mètr. ; on aura donc :

$$F = \frac{1}{f} = \frac{1}{n \times 0.02777} = \frac{36}{n}.$$

462. **Signification du numéro ou pouvoir dioptrique d'une lentille.** — A. Imbert a déduit cette signification des considérations suivantes :

Soient une lentille, assez mince pour qu'on puisse supposer ses

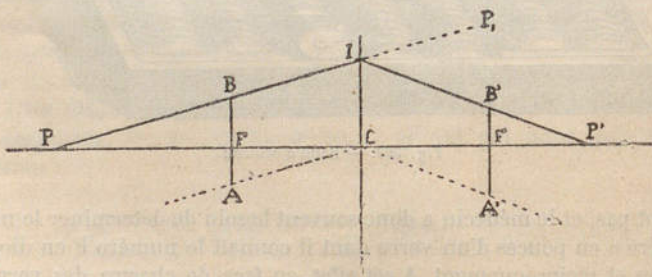


Fig. 307. — Déviation constante produite par une lentille sphérique.

deux points principaux confondus en un seul C (fig. 307), et un rayon incident PI , auquel correspond le rayon réfracté IP' .

La considération des angles du triangle PIP' donne :

$$\text{angle } P_1IP' = \text{angle } IPP' + \text{angle } IP'P; \quad (1)$$

or dans les triangles rectangles IPC, IP'C, on a :

$$\begin{aligned} \text{tg IPC} &= \frac{\text{IC}}{\text{PC}} = \frac{\text{IC}}{p} \\ \text{tg IP'C} &= \frac{\text{IC}}{\text{P'C}} = \frac{\text{IC}}{p'} \end{aligned}$$

Si le rayon PI est très peu incliné sur l'axe de la lentille, condition que nous supposons toujours réalisée, on peut admettre que les tangentes précédentes sont égales aux arcs correspondants, si bien que l'égalité (1) peut alors s'écrire :

$$\text{angle } P_1IP' = \frac{\text{IC}}{p} + \frac{\text{IC}}{p'} = \text{IC} \left(\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \right) = \frac{\text{IC}}{f}, \quad (2)$$

f étant la distance focale de la lentille considérée.

L'angle P_1IP' mesurant la déviation que la réfraction à travers la lentille imprime au rayon incident quelconque PI, l'égalité (2) montre que :

Une lentille imprime une déviation constante à tout rayon incident, quelle que soit sa direction, qui la rencontre à la même distance IC de l'axe; cette déviation est proportionnelle à $\frac{1}{f}$, c'est-à-dire au pouvoir dioptrique de la lentille; le pouvoir dioptrique peut donc être pris pour mesure de cette déviation.

On déduit immédiatement de là les définitions suivantes de l'unité de pouvoir dioptrique ou *dioptrie* et de la série des verres, dite *métrique*, adoptée par le Congrès de 1875 :

1° L'unité de pouvoir dioptrique ou *dioptrie* est la déviation constante imprimée, par la lentille de 1 mètr. de distance focale, à tout rayon incident qui la rencontre à une distance déterminée de son axe;

2° Les lentilles de 1, 2, 3... dioptries sont telles que, en passant de l'une quelconque d'entre elles à la suivante, l'augmentation de déviation imprimée à tout rayon incident est constante et égale à la déviation imprimée à ce même rayon par le verre unité de une *dioptrie*.

463. **Mesure des distances en dioptries.** — Dans toutes les questions de pratique oculistique qui comportent l'emploi de lentilles et la considération de longueurs, comptées à partir d'une même origine, il y a avantage à mesurer celles-ci non pas par le nombre

de mètres ou de fractions de mètres qu'elles contiennent, mais par l'inverse de ce nombre.

Par suite, lorsqu'une longueur contiendra d mètres, nous prendrons pour mesure de cette longueur le quotient $\frac{1}{d}$ et ce quotient exprimera encore des *dioptries*.

Prenons donc sur une droite indéfinie, à partir d'un même point O , et toujours dans le même sens, des longueurs OA , OB , OC , OD ... respectivement égales à 1^m , $0^m.50$, $0^m.33$, $0^m.25$... ;

on dira que la distance OA est égale à $\frac{1}{1} = 1$ dioptrie,

$$- \quad OB \quad - \quad \frac{1}{0.50} = 2 \text{ dioptries,}$$

$$- \quad OC \quad - \quad \frac{1}{0.33} = 3 \text{ dioptries,}$$

$$- \quad OD \quad - \quad \frac{1}{0.25} = 4 \text{ dioptries.}$$

.....
En particulier, une distance infinie est exprimée par $\frac{1}{\infty} = 0$ dioptrie.

Des longueurs analogues OA' , OB' ,... pourront être comptées en sens inverse des précédentes; on distinguera d'ailleurs le sens dans lequel les longueurs sont comptées en affectant du signe $+$ ou du signe $-$ le nombre de dioptries qui mesure chacune de ces longueurs.

L'avantage que présente cette manière de mesurer les distances résulte, comme on va le voir, de ce que, dans la formule des lentilles en p et p' , ces longueurs n'entrent que par leurs inverses $\frac{1}{p}$ et $\frac{1}{p'}$.

464. **Formule des lentilles en dioptries.** — Convenons d'exprimer en dioptries les distances p et p' des foyers conjugués à la lentille, ce qui revient à poser :

$$\frac{1}{p} = P, \quad \text{et} \quad \frac{1}{p'} = P',$$

P et P' représentant dès lors des dioptries; soit en outre F le pouvoir dioptrique $\frac{1}{f}$ de la lentille :

La formule classique

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

relative aux lentilles convergentes, devient alors :

$$P + P' = F. \quad (1)$$

Dans le cas des lentilles divergentes, on aura, si l'on met le signe de f en évidence :

$$P + P' = -F. \quad (2)$$

Dans ces formules, P est positif ou négatif suivant que cette distance est comptée, à partir de la lentille, du côté d'où vient la lumière ou en sens inverse ; au contraire P' est positif ou négatif suivant que cette longueur est comptée, à partir de la lentille, du côté d'où ne vient pas la lumière ou en sens inverse.

En d'autres termes, l'objet sera réel ou virtuel suivant que P sera positif ou négatif ; l'image sera de même réelle ou virtuelle suivant que P' sera positif ou négatif.

Quelques exemples numériques feront bien comprendre l'avantage qui résulte de l'emploi des formules en dioptries.

Soit à déterminer la position de l'image d'un objet situé à $+2^d$ ($0^m.50$) d'une lentille positive de 5^d ($f=0^m.20$). Il faudra, dans la formule (1), remplacer P par $+2^d$ et F par $+5^d$; on trouve alors :

$$P' = 5^d - 2^d = +3^d$$

L'image est donc réelle et située à 3^d ($0^m.33$) en arrière de la lentille.

De même, si l'objet était situé à $+10^d$ ($0^m.10$) en avant de la même lentille, la distance P' de l'image serait donnée par la formule :

$$P' = 5^d - 10^d = -5^d.$$

Cette image serait donc virtuelle et située à 5^d ($0^m.20$) en avant de la lentille.

La formule (2) permettra de résoudre la même question pour les lentilles négatives. Si, par exemple, un objet est situé à $+3^d$ ($0^m.33$) en avant d'une lentille négative de 4^d ($f=0^m.25$), la position de l'image sera donnée par l'expression :

$$P' = -4^d - 3^d = -7^d,$$

ce qui veut dire que l'image est virtuelle et située à 7^d ou $\frac{1}{7}$ de mètre ($0^m.143$) en avant de la lentille.

Ajoutons qu'il est presque inutile, en Ophthalmologie, d'exprimer en mètres les distances dont on connaît la mesure en dioptries, circonstance qui contribue à rendre plus avantageux encore l'emploi des formules (1) et (2).

465. **Discussion algébrique de la formule des lentilles en dioptries.** — Pour faire cette discussion, il suffit de faire varier P depuis $+0^d$ (ou $p = +\infty$) jusqu'à -0^d (ou $p = -\infty$) et de déduire des formules (1) et (2) du paragraphe précédent les valeurs correspondantes de P' .

Les résultats de la discussion de la formule

$$P' = F - P,$$

relative aux lentilles convergentes ou positives, sont contenus dans le tableau suivant :

Valeurs de P .		Valeurs correspondantes de P' .	
$P = +0$	$(p = +\infty)$	$P' = F$	$(p' = f)$
$+0 < P < \frac{F}{2}$	$(+\infty > p > 2f)$	$F' > P' > \frac{F'}{2}$	$(f' < p' < 2f')$
$P = \frac{F}{2}$	$(p = 2f)$	$P' = \frac{F'}{2}$	$(p' = 2f')$
$F > P > \frac{F}{2}$	$(f' < p < 2f)$	$+0 < P' < \frac{F'}{2}$	$(+\infty > p' > 2f')$
$P = F$	$(p = f)$	$P' = \pm 0$	$(p' = \pm \infty)$
$\infty > P > F$	$(0 < p < f)$	$-0 > P' > -\infty$	$(-\infty < p' < 0)$
$P = \infty$	$(p = 0)$	$P' = \infty$	$(p' = 0)$
$-0 > P > -\infty$	$(-\infty < p < 0)$	$\infty > P' > F'$	$(0 < p' < f')$
$P = -0$	$(p = -\infty)$	$P' = F'$	$(p' = f')$

La formule $P' = -F - P$, relative aux lentilles divergentes ou négatives, est tout aussi facile à discuter que la précédente.

466. **Pouvoir dioptrique de plusieurs lentilles associées.** — Il est bien des fois nécessaire, en Ophthalmologie, d'associer plusieurs lentilles et de considérer le pouvoir dioptrique résultant de cette association. Ce pouvoir dioptrique sera $\frac{1}{\varphi} = \Phi$, φ étant la distance focale du système complexe constitué par les lentilles associées.

La méthode de calcul exposée sommairement plus haut (§ 444) permet d'obtenir l'expression de φ et par suite celle de Φ .

Lorsque les lentilles sont juxtaposées et qu'elles sont en outre assez minces pour que l'on puisse négliger la distance du second point principal de chacune d'elles au premier point principal de la suivante, l'expression de φ , et par suite celle de Φ , sont remarquablement simples. Si, en effet, f_1, f_2, f_3, \dots représentent les distances focales des lentilles associées, on démontre que l'on a :

$$\frac{1}{\varphi} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3} + \dots,$$

ou :

$$\Phi = F_1 + F_2 + F_3 + \dots$$

Par exemple, si l'on associe, dans les conditions que nous venons d'indiquer, deux lentilles de $+2^d$ et de $+3^d$, ou de $+3^d$ et de -1^d , ou de $+2^d$ et de $-5^d, \dots$, l'effet résultant sera le même que celui d'une lentille unique de $+2^d + 3^d = +5^d$, ou de $+3^d - 1^d = +2^d$, ou de $+2^d - 5^d = -3^d, \dots$

Lorsque les distances du second point principal de chaque lentille au premier point principal de la suivante ne sont pas négligeables, comme cela arrive quand on associe des lentilles de pouvoirs dioptriques élevés dont les épaisseurs ne peuvent être négligées, la relation entre Φ, F_1, F_2, \dots est assez complexe. Dans le cas particulier de l'association de deux lentilles, cas qui se présente fréquemment en Oculistique, on démontre que l'on a :

$$\Phi = F_1 + F_2 - dF_1F_2,$$

où d est la distance du second point principal de la première lentille au premier point principal de la seconde. Il résulte de là, par exemple, que le pouvoir dioptrique résultant de l'association de deux lentilles de même numéro, mais de signes contraires, $+F_1$ et $-F_1$ est :

$$\Phi = +F_1 - F_1 + dF_1F_1 = +dF_1^2$$

c'est-à-dire égal à celui d'une lentille convergente ou positive de numéro égal à dF_1^2 .

467. **Aberration de sphéricité des lentilles sphériques.** — Les résultats auxquels nous sommes arrivés relativement à la réfraction de la lumière à travers les lentilles ne sont exacts que si les rayons considérés ne font qu'un très petit angle d'incidence sur

la face d'entrée de la lentille. Dans le cas contraire, l'homocentricité n'est pas conservée dans le faisceau réfracté, les rayons marginaux, c'est-à-dire ceux qui tombent sur les parties périphériques de la lentille, allant rencontrer l'axe principal plus près de la lentille que les rayons centraux.

Cette aberration de sphéricité est d'autant plus grande que la courbure des faces de la lentille est plus accusée ; par contre, elle diminue, toutes choses égales d'ailleurs, lorsque l'indice de la substance qui constitue la lentille augmente. L'aberration varie encore avec la forme de la lentille, avec le rapport des courbures des deux faces, et avec la face de la lentille par laquelle pénètre la lumière, si la lentille n'est pas équiconvexe.

On conçoit combien la considération de l'aberration de sphéricité et sa correction sont importantes au point de vue de la netteté des images fournies par les instruments d'optique. Mais c'est là une question qui n'intéresse le médecin qu'indirectement, et sur laquelle nous ne croyons pas, en conséquence, devoir insister.

Nous nous bornerons à ajouter à ce qui précède que, grâce à l'emploi de diaphragmes, c'est-à-dire d'écrans opaques percés d'une ouverture centrale et placés sur la direction suivie par la lumière, on peut supprimer les rayons les plus marginaux et diminuer ainsi tout au moins l'aberration de sphéricité.

468. **Lentilles cylindriques.** — Les lentilles cylindriques sont utilisées pour la correction optique de l'astigmatisme, et la fréquence de leur emploi résulte de la fréquence même de cette anomalie de la vision. Elles peuvent être plan-cylindriques ou sphéro-cylindriques.

Les lentilles plan-cylindriques ont une face plane, tandis que l'autre face, qui peut être convexe ou concave, est une portion de la surface d'un cylindre droit à base circulaire.

La figure 308 représente une lentille plan-cylindrique convexe; on peut la regarder comme détachée, dans un cylindre, par un plan sécant mené parallèlement à l'axe à une certaine distance de celui-ci. La courbure d'une telle lentille est variable suivant le méridien dans lequel on considère cette courbure. Si l'on coupe, en effet, la lentille par le plan $MM'N'N$, parallèle aux génératrices du cylindre dont fait partie la face antérieure, la section faite par ce plan dans les deux faces de la lentille se composera de deux droites parallèles MN , $M'N'$. La courbure de la lentille dans ce méridien sera donc nulle, et la réfraction, pour tous les rayons situés dans

ce plan, s'effectuera comme à travers une lame à faces parallèles; ces rayons n'éprouveront donc pas de déviation angulaire.

Si l'on coupe au contraire la lentille par des plans de plus en plus inclinés par rapport aux génératrices, la section de la face plane sera toujours une droite, tandis que la section de la face cylindrique sera une ellipse dont la courbure augmentera à mesure que l'inclinaison du plan de section sera elle-même plus grande. Lorsque ce plan est perpendiculaire aux génératrices, la courbure de la section de la face cylindrique est maxima, et la courbe de section HLK devient une circonférence de cercle; c'est la section droite du cylindre.

Une lentille plan-cylindrique concave (fig. 309) peut être regar-

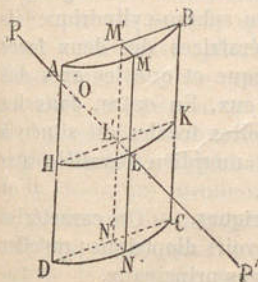


Fig. 308. — Lentille plan-cylindrique convexe.

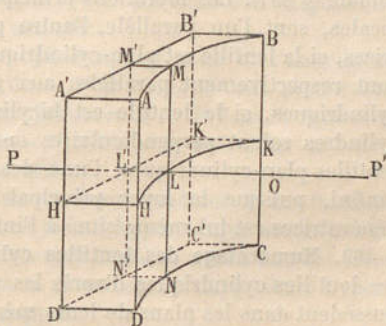


Fig. 309. — Lentille plan-cylindrique concave.

dée comme obtenue au moyen d'une lame de verre à faces parallèles dont l'une des faces ABCD a été creusée de manière à constituer une portion AMBCND de la surface d'un cylindre droit à base circulaire.

La section d'une telle lentille par tout plan parallèle aux génératrices de la face cylindrique est encore constituée par deux droites parallèles telles que MN, M'N'; lorsque le plan de section est de plus en plus incliné par rapport aux génératrices, la section de la face antérieure est encore une ellipse de courbure croissante, puis une circonférence HLK, section droite du cylindre, au moment où le plan de section devient perpendiculaire aux génératrices.

Si l'on associe deux lentilles plan-cylindriques en accolant leurs faces planes, on obtient une lentille bicylindrique; le but à at-

teindre par l'emploi d'une telle association exige généralement d'ailleurs que les deux lentilles soient orientées de telle sorte que les axes des faces cylindriques, et par suite les génératrices, soient perpendiculaires entre eux.

On fait un fréquent usage, en Ophtalmologie, de lentilles sphéro-cylindriques, sphériques sur l'une de leurs faces, cylindriques sur l'autre; on peut les regarder comme résultant de l'association d'une lentille plan-cylindrique et d'une lentille plan-sphérique accolées par leurs faces planes.

Lorsqu'un mince faisceau incident homocentrique traverse l'une des lentilles précédentes, la forme du faisceau réfracté est la même que celle qui résulte de la réfraction à travers une surface ellipsoïdale (§ 437). Les méridiens principaux, et par suite les droites focales, sont l'un parallèle, l'autre perpendiculaire aux génératrices, si la lentille est plan-cylindrique ou sphéro-cylindrique; ils sont respectivement parallèles aux génératrices des deux faces cylindriques, si la lentille est bicylindrique et que les axes des cylindres soient perpendiculaires entre eux. En outre, dans les lentilles plan-cylindriques, l'une des droites focales est située à l'infini, puisque le foyer principal du méridien parallèle aux génératrices est lui-même situé à l'infini.

469. Numérotage des lentilles cylindriques. — On caractérise les lentilles cylindriques d'après les pouvoirs dioptriques qu'elles possèdent dans les plans de leurs méridiens principaux.

Soit d'abord une lentille plan-cylindrique. Dans le méridien parallèle aux génératrices, l'effet de la lentille se réduit à celui d'une lame de verre à faces parallèles; on peut dire que le foyer principal de ce méridien est à l'infini, et que son pouvoir dioptrique est de 0 dioptrie. Dans le plan perpendiculaire aux génératrices, l'effet produit est le même que celui d'une lentille plan-sphérique de même substance dont le rayon de courbure serait le rayon OL (fig. 308 et 309) de la section droite; le pouvoir dioptrique de la lentille, dans ce plan, est donc égal au numéro ou pouvoir dioptrique F de la lentille sphérique, concave ou convexe, définie comme nous venons de le dire. Des deux pouvoirs dioptriques ou numéros de la lentille plan-cylindrique, l'un est par conséquent toujours égal à 0; l'autre suffit pour caractériser la lentille.

Une lentille plan-cylindrique de 1, 2, 3, ... dioptries est par suite une lentille qui, dans un plan perpendiculaire aux génératrices, produit le même effet qu'une lentille sphérique de 1, 2, 3, ... dioptries.

Soit maintenant une lentille sphéro-cylindrique, que l'on peut toujours regarder comme résultant de l'accolement, par leurs faces planes, d'une lentille plan-sphérique et d'une lentille plan-cylindrique.

Dans le plan parallèle aux génératrices, l'effet produit par la lentille sphéro-cylindrique se réduit à celui de la lentille plan-sphérique constituante, dont nous représenterons le numéro par F . Dans le plan perpendiculaire aux génératrices, au contraire, l'effet se composera des effets produits par la lentille plan-sphérique dont le numéro est F et par la lentille plan-cylindrique dont le numéro F' est caractérisé comme nous l'avons dit plus haut. Or, d'après les formules du paragraphe 466, cet effet résultant sera mesuré par la somme algébrique $F + F'$ des numéros ou pouvoirs dioptriques des deux lentilles associées.

Si donc une lentille sphéro-cylindrique résulte de l'association d'une lentille plan-sphérique de -3^d et d'une lentille plan-cylindrique de $+4^d.5$, ses deux numéros seront -3^d dans le méridien parallèle aux génératrices et $-3^d + 4^d.5 = +1^d.5$ dans le méridien perpendiculaire aux génératrices.

470. **Lentilles hyperboliques.** — Pour remédier à des troubles de la vision qui résultent d'une forme hyperbolique accentuée de la cornée, on s'est quelquefois servi de lentilles dont l'une des faces est plane tandis que l'autre a la forme d'une nappe d'un hyperboloïde de révolution à deux nappes.

Rœhlmann, qui a fait construire de telles lentilles, les numérotait d'après la valeur de l'angle au sommet du cône asymptote de l'hyperboloïde qui constitue l'une des faces.

CHAPITRE IV

INSTRUMENTS D'OPTIQUE

471. **Des instruments d'optique en général.** — On appelle *instruments d'optique* des appareils constitués par un ensemble plus ou moins complexe de surfaces réfléchissantes et de lentilles, et destinés à venir en aide à la vision en amplifiant les images qui se dessinent sur la rétine. Le rôle de ces instruments ne saurait être séparé de l'intervention de l'œil de l'observateur, ce qui nous amène à donner ici quelques indications sur la formation des images dans l'œil et sur la relation qui existe entre les dimensions

d'un objet placé devant l'œil, la distance de cet objet en avant de la cornée et les dimensions de son image rétinienne.

472. De l'œil et de la vision. — L'œil humain peut être considéré comme un système sphérique centré. Les points principaux et nodaux de ce système sont suffisamment rapprochés pour qu'on puisse les regarder comme fusionnés deux à deux. Le point unique qui représente les points principaux fusionnés est situé à 2 millimètres en arrière de la cornée; le point unique qui représente de même les points nodaux fusionnés, est à 7 millimètres en arrière de la cornée. On démontre d'ailleurs qu'il résulte de là que le système dioptrique oculaire peut être remplacé par un dioptrique unique dont le sommet serait situé à 2 millimètres en arrière de la cornée, dont le rayon de courbure serait de 5 millimètres et dont les milieux constituants seraient l'air en avant et un milieu d'indice $\frac{4}{3}$, l'eau par exemple, en arrière; ce dioptrique unique, que

l'on peut substituer à l'œil réel, a reçu le nom d'*œil réduit*. La construction des images est dès lors simplifiée, grâce à la substitution d'axes secondaires aux rayons parallèles passant par les points nodaux. Mais l'œil se distingue des systèmes réfringents que l'on peut matériellement réaliser en ce qu'il est un système à pouvoir dioptrique variable. Nous pouvons en effet, grâce à un mécanisme spécial qui constitue l'appareil de l'*accommodation* et qui détermine des variations de courbure de la lentille oculaire (*crystallin*), faire varier à volonté ce pouvoir entre certaines limites; il résulte de là, pour nous, la possibilité de faire successivement former avec netteté sur un même écran nerveux, la *rétine*, dont la position est cependant invariable, l'image d'objets situés à diverses distances de l'œil. Ces variations de courbure du cristallin seront d'ailleurs exprimées, dans l'œil réduit, par une variation du rayon de courbure du dioptrique unique que l'on substitue à l'appareil dioptrique oculaire, les nombres donnés plus haut se rapportant à la courbure minima des deux faces de la lentille oculaire.

Les variations de courbure des faces du cristallin ayant évidemment des limites, la faculté d'adaptation ou d'*accommodation* de l'œil pour la vision nette à diverses distances a des limites elle-même. Il est évident d'ailleurs que la courbure des faces de la lentille oculaire devra être d'autant plus grande ou d'autant plus petite que nous voudrions voir nettement à une distance plus petite ou plus grande.

On conçoit dès lors qu'il existe un point au delà duquel et un autre point en deçà duquel la vision n'est plus nette. Ces points ont reçu, le premier le nom de *punctum remotum*, le second le nom de *punctum proximum*. Comme d'ailleurs ces points peuvent, l'un et l'autre, être virtuels, leur véritable définition est la suivante : Le *remotum* est le foyer conjugué de la rétine au moment où les faces du cristallin ont leur courbure minima ; le *proximum* est, de même, le foyer conjugué de la rétine lorsque les faces du cristallin présentent leur courbure maxima.

Les positions de ces points varient d'une personne à l'autre et peuvent même être différentes pour les deux yeux d'un même sujet.

La construction de l'image qui va se peindre sur la rétine est

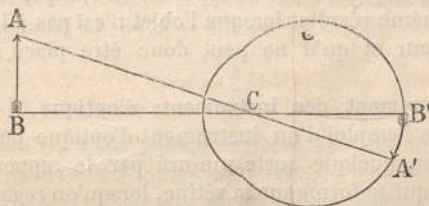


Fig. 310. — Construction de l'image rétinienne d'un objet.

encore simplifiée par ce fait que la position de l'écran rétinien est invariable et connue. Soit, en effet, un objet AB (fig. 310) placé devant un œil réduit ; il suffira, pour en déterminer l'image rétinienne, de mener les axes BB', AA' passant par les extrémités de l'objet ; l'image cherchée sera B'A'.

Il résulte de cette construction que la dimension de l'image rétinienne est proportionnelle ⁽¹⁾ à la grandeur de l'angle ACB ou *angle visuel*. Lorsque l'objet est assez petit, ce que nous supposerons toujours dans la suite, l'angle visuel est lui-même assez petit pour que l'arc qui le sous-tend puisse être confondu avec sa tangente $\frac{0}{D}$, 0 désignant la dimension AB de l'objet, et D la distance BC de

cet objet au centre de courbure C de l'œil réduit. Le rapport $\frac{0}{D}$, ou

(1) En réalité la proportionnalité n'est pas rigoureuse à cause des déplacements des points nodaux pendant l'accommodation.

la tangente de l'angle sous lequel on voit un objet, porte le nom de *diamètre apparent* de l'objet. On voit immédiatement que la grandeur linéaire de l'image rétinienne d'un objet de petites dimensions est proportionnelle au diamètre apparent de cet objet.

Il résulte de là que, pour mieux distinguer les détails d'un objet, nous avons avantage à le voir sous un angle visuel plus grand, c'est-à-dire à le placer, si l'objet est à notre disposition, à la plus petite distance (*punctum proximum*) pour laquelle la vision reste encore nette.

Mais il est possible que l'image obtenue dans ces conditions soit encore trop petite pour que l'on puisse distinguer les détails de l'objet ; on fait usage alors d'un instrument d'optique, grâce auquel on peut, comme nous allons le voir, amplifier encore l'image rétinienne. L'emploi d'un instrument d'optique sert aussi à atteindre le même résultat lorsque l'objet n'est pas à la disposition de l'observateur et qu'il ne peut donc être placé au *punctum proximum*.

473. Grossissement des instruments d'optique. — L'avantage qui résulte de l'emploi d'un instrument d'optique pour examiner un objet est en quelque sorte mesuré par le rapport qui existe entre l'image qui se forme sur la rétine, lorsqu'on regarde à travers cet instrument, et l'image rétinienne fournie directement par l'œil de l'observateur, lorsque l'objet se trouve, par rapport à cet œil, dans les meilleures conditions où il soit possible à l'observateur de le placer. C'est à ce rapport que l'on donne le nom de *grossissement*.

Les images rétiniennes étant proportionnelles aux diamètres apparents des objets correspondants, on peut dire encore que :

Le grossissement d'un instrument d'optique est le rapport qui existe entre le diamètre apparent de l'objet vu à l'aide de l'instrument et le diamètre apparent de l'objet vu directement, lorsque cet objet se trouve dans les meilleures conditions où il soit possible à l'observateur de le placer, c'est-à-dire dans la position qui correspond à la plus grande image rétinienne. Cette position n'est d'ailleurs celle du *proximum* que si l'objet est à la disposition de l'observateur, ce qui n'est pas toujours réalisé.

Soit donc O la dimension d'un objet, D la distance minima à laquelle l'observateur puisse le placer en avant du centre de son œil que nous supposons être un œil réduit, I la dimension de l'image aérienne donnée par l'instrument d'optique employé, d la

distance de cette image au centre de l'œil. Le grossissement G sera donné par la formule :

$$G = \frac{I}{d} \cdot \frac{O}{D} = \frac{I}{O} \times \frac{D}{d}. \quad (a)$$

Trois cas peuvent se présenter, auxquels correspondent trois classes différentes d'instruments.

1° L'observateur peut faire varier à volonté la distance D de l'objet à l'œil, de même que la distance d de l'image à l'œil, sans modifier pour cela la grandeur linéaire I de cette image. Tel est le cas des *appareils de projection* qui donnent des images réelles que l'on reçoit sur un écran. L'observateur pouvant, dans ce cas, placer l'objet et l'image dans les conditions les plus favorables, c'est-à-dire à la distance π de son proximum, on doit admettre que $D=d=\pi$; la formule (a) devient alors :

$$G = \frac{I}{O}. \quad (1)$$

le grossissement ne dépend donc, dans ce cas, que du rapport des dimensions linéaires de l'image et de l'objet.

2° L'observateur a l'objet à sa disposition et peut le placer à son proximum, mais il ne peut faire varier la distance d de l'image qu'en faisant varier ses dimensions I , conditions qui se trouvent réalisées lors de l'emploi de la loupe et du microscope. La valeur du grossissement, qui est alors donné par la formule :

$$G = \frac{I}{O} \times \frac{\pi}{d}, \quad (2)$$

dépend de plusieurs conditions que nous discuterons plus loin.

3° L'objet se trouve à une distance fixe et invariable D en avant de l'œil observateur. C'est le cas des objets éloignés que l'on examine à l'aide de *lunettes* ou de *télescopes*; ces instruments sont généralement disposés de façon que l'on puisse faire varier la distance de l'image à l'œil; mais, les dimensions de cette image variant dans ces conditions, la formule du grossissement

$$G = \frac{I}{O} \times \frac{D}{d} \quad (3)$$

peut donner lieu à une discussion analogue à celle du cas précédent.

Dans ce qui va suivre, nous étudierons successivement les instruments qui correspondent à chacune des trois catégories que nous venons d'établir par la considération du grossissement.

I. — Appareils de projection.

474. **Principe des appareils de projection.** — Ces appareils, dont la figure 311 représente un modèle, sont disposés de façon à donner sur un écran l'image agrandie d'une photographie ou d'un objet transparent. Pour cela, l'objet est placé entre le premier plan antiprincipal et le premier plan focal d'un *objectif* constitué par une lentille convergente ou par un système convergent formé de

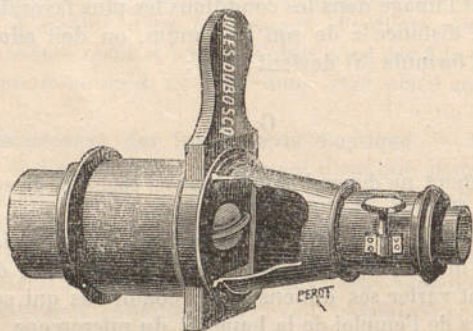


Fig. 311. — Appareil de projection.

plusieurs lentilles; cet objectif donne, dans ces conditions (§ 438), une image réelle, renversée et agrandie entre son second plan antiprincipal et l'infini. La position de l'écran étant en général invariable, un bouton à crémaillère permet, en déplaçant l'objectif, de faire varier la distance p de son premier plan principal à l'objet, et, par là, de *mettre au point*, c'est-à-dire d'amener l'image à se former nettement sur l'écran, à une distance du second plan principal que nous représenterons par p' .

L'observateur pouvant se placer à toute distance de l'objet et de l'image, le grossissement est alors donné par la formule (1, § 473) :

$$G = \frac{1}{0} \frac{p'}{p} = \frac{p' - \varphi}{\varphi},$$

en désignant par φ la distance focale du système.

Si l'on remarque que φ est généralement très petit (quelques centimètres) par rapport à p' (plusieurs mètres), on peut négliger φ devant p' et écrire :

$$G = \frac{p'}{\varphi},$$

formule qui montre que le grossissement est d'autant plus grand que la distance focale de l'objectif est plus petite et que la distance de l'écran est plus grande.

Mais il faut remarquer que l'éclairement de l'image est aussi d'autant moindre que le grossissement est plus fort, puisque la quantité de lumière venue de l'objet, et que nous supposons invariable, est alors répartie sur une surface plus grande ; il y a toujours en outre des pertes de lumière par suite des réflexions et des absorptions qui se produisent au niveau des lentilles de l'objectif. Il est donc nécessaire, si l'on veut que la grande image obtenue soit bien éclairée, d'éclairer d'une façon assez intense l'objet à projeter. A cet effet, les appareils de projection sont munis d'un second système de lentilles (*système éclairant*) qui est disposé de façon à transformer un faisceau incident parallèle de rayons solaires, ou un faisceau divergent venu d'une source artificielle (lumière électrique, lumière oxydrique, etc.), en un faisceau plus ou moins convergent suivant les besoins. L'objet, placé sur le trajet du faisceau réfracté convergent, est alors d'autant plus éclairé qu'il se trouve dans une partie plus rétrécie du faisceau.

475. **Microscope solaire.** — C'est un appareil de projection destiné à donner sur un écran des images très amplifiées et suffisamment éclairées d'objets très petits. Pour cela, on emploie un objectif de distance focale très faible, constitué par des lentilles très petites. L'écran étant placé à une distance que l'on peut regarder comme très grande par rapport à la distance focale de l'objectif, l'objet doit être situé très près du premier foyer principal de l'objectif, tout en étant au delà de ce foyer. La mise au point se fait d'abord à l'aide d'une crémaillère qui permet d'imprimer à l'objectif des déplacements étendus ; elle s'achève à l'aide d'un pas de vis très fin qui entraîne l'objectif d'un mouvement très lent.

L'objet, qui a des dimensions très petites, doit être placé en outre à peine au delà du foyer principal des rayons solaires employés pour l'éclairement. Or en ce point se trouve également concentrée, comme nous le verrons plus loin, une grande quantité de chaleur ;

aussi les objets à projeter se détérioreraient-ils rapidement, si on n'interposait, sur le trajet du faisceau éclairant, un cuve en verre à faces parallèles contenant de l'eau ou mieux une solution d'alun. Cette solution jouit en effet de la propriété d'être transparente pour la lumière et d'absorber au contraire une grande partie de la chaleur qui accompagne les rayons solaires.

II. — Loupe et microscope.

476. **Grossissement dans la loupe.** — La *loupe* ou *microscope simple* est constituée par une lentille convergente. En général l'observateur place l'objet entre le premier point focal et la lentille; celle-ci donne alors une image virtuelle et agrandie ⁽¹⁾.

Les dimensions linéaires de cette image varient avec la distance à laquelle on la fait former, et son diamètre apparent $\frac{I}{d}$ ne reste pas constant, à moins que l'œil observateur n'occupe une position particulière que nous indiquerons plus loin. Il résulte de là, comme nous allons le voir, que le grossissement obtenu avec une loupe, et dont la formule générale est

$$G = \frac{I}{O} \times \frac{\pi}{d},$$

dépend, pour un même observateur, des conditions d'emploi de la loupe, c'est-à-dire de la position occupée par l'œil de l'observateur et, en général, de l'état de la vision dans cet œil ou de la distance à laquelle on fait former l'image. La formule montre d'ailleurs que, dans les mêmes conditions d'emploi de la loupe, ou pour une même valeur de $\frac{I}{d}$, le grossissement dépend, pour des observateurs différents, de la position de leur proximum. Nous nous occuperons seulement ici des variations que le grossissement présente, pour un même observateur, avec les conditions d'emploi de la loupe.

Remarquons d'abord que l'image virtuelle, donnée par la loupe, d'un objet AB (fig. 312) peut occuper toutes les positions possibles A'B', A''B''... entre la lentille et l'infini, suivant la position que

⁽¹⁾ Faute de pouvoir donner ici des notions suffisantes sur l'œil *hypermétrope*, nous ne considérerons que le cas où l'image fournie par la loupe est virtuelle.

l'on donne à l'objet entre la lentille et le foyer principal. Cette image est d'ailleurs toujours limitée par l'axe principal FF' et par la caractéristique $A''F'$.

1° Supposons que l'œil observateur, ou plus exactement le centre de courbure du dioptré simple auquel on peut réduire cet œil, soit situé au delà du point focal F' , en C par exemple. On voit immédiatement sur la figure que le diamètre apparent $A'CB'$, $A''CB''$,...

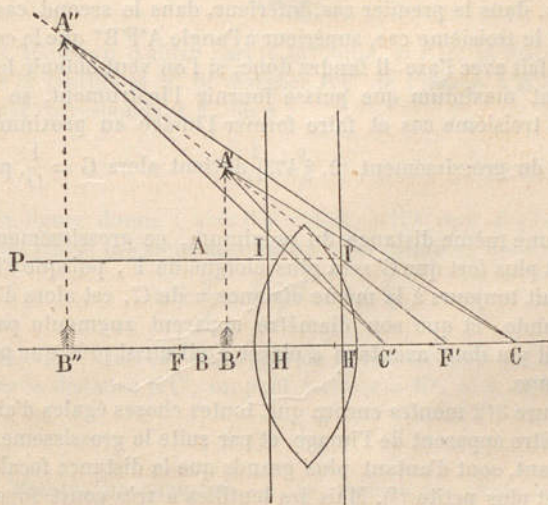


Fig. 312. — Des diverses valeurs que peut présenter le grossissement d'une loupe suivant la position de l'œil observateur.

de l'image est d'autant plus grand que cette image est située plus loin. Le grossissement sera donc plus fort à mesure que l'image sera plus éloignée et atteindra, pour un même observateur, sa valeur maxima lorsque l'image sera au remotum.

2° Dans le cas où l'œil observateur coïncide avec le foyer F' , le diamètre apparent sous lequel on voit l'image est indépendant de la position de celle-ci, puisque ce diamètre apparent est précisément égal à l'angle $A''F'B''$ que fait la caractéristique avec l'axe. Le grossissement a alors une valeur invariable, pour un même observateur, quelle que soit la position de l'image.

3° Lorsqu'enfin l'œil observateur est entre le foyer F' et la loupe, en C' par exemple, le diamètre apparent $A'CB'$, $A''C'B''$,...

sous lequel on voit l'image, augmente à mesure que cette image se rapproche, bien que, dans ces conditions, la grandeur linéaire $A''B'$, $A'B'$..., devienne plus petite. Le grossissement est alors d'autant plus grand que l'image se forme plus près et devient maximum, pour un même observateur, lorsque l'image se forme au proximum.

Remarquons encore que l'angle sous lequel on voit l'image est toujours, dans le premier cas, inférieur, dans le second cas, égal et, dans le troisième cas, supérieur à l'angle $A''F''B''$ que la caractéristique fait avec l'axe. Il faudra donc, si l'on veut obtenir le grossissement maximum que puisse fournir l'instrument, se placer dans ce troisième cas et faire former l'image au proximum. La formule du grossissement (2, § 473) devient alors $G = \frac{1}{0}$, puisque $d = \pi$.

Pour une même distance du proximum, ce grossissement sera d'autant plus fort que C' sera plus éloigné de F' , puisque l'image, qui se fait toujours à la même distance π de C' , est alors d'autant plus grande, et que son diamètre apparent augmente par cela même. Il y a donc avantage à placer l'œil aussi près que possible de la loupe.

La figure 342 montre encore que, toutes choses égales d'ailleurs, le diamètre apparent de l'image, et par suite le grossissement correspondant, sont d'autant plus grands que la distance focale de la loupe est plus petite ⁽¹⁾. Mais les lentilles à très court foyer présentent des aberrations telles que l'image qu'elles fournissent n'est plus suffisamment nette. Pour remédier à cet inconvénient, on supprime, dans ces lentilles, les rayons marginaux par des diaphragmes appropriés (*loupes diaphragmées*), ou l'on associe deux lentilles (*loupes composées*), de façon à obtenir un système ne présentant pas les mêmes aberrations qu'une lentille unique et capable cependant de donner le même grossissement.

Dans le cas particulier où l'image se forme au proximum de l'œil observateur et où cet œil est très près de la loupe, le grossis-

⁽¹⁾ Il faut remarquer que lorsque f diminue, le foyer F' se rapproche du centre C' de l'œil; pour une valeur suffisante de f , le foyer F' doit même passer en avant de C' , puisque l'œil reste toujours forcément à une certaine distance de la lentille et que le point C' est à l'intérieur de l'œil. Le grossissement maximum que puisse donner la loupe continue pourtant à augmenter à mesure que f diminue.

sement se met sous une forme explicite simple. Nous avons vu, en effet, que l'on a, dans le cas général :

$$G = \frac{1}{O} \times \frac{\pi}{d},$$

formule qui, lorsque $d = \pi$, se réduit à :

$$G = \frac{1}{O},$$

Nous avons vu d'autre part (§ 437) que, si f est la distance focale de la lentille et q' la distance B'F' de l'image A'B' au foyer principal correspondant F', on a :

$$\frac{1}{O} = \frac{q'}{f}.$$

Mais la figure donne : $q' = B'F' = B'H' + HF' = p' + f$, en désignant ici par p' la valeur absolue de cette distance, donc :

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

Si, en outre, l'œil est assez près de la lentille pour qu'on puisse négliger la distance H'C', on peut écrire $p' = B'C' = \pi$, et il vient :

$$G = 1 + \frac{\pi}{f}.$$

477. **Microscope composé.** — Le microscope composé a été imaginé en 1590 par Zaccharie Jansen ; Frauenhoffer, Amici, Chevalier, Oberhauser, Nachet, etc., etc., y ont apportés des perfectionnements successifs.

On peut faire l'étude du microscope composé en déterminant la position des points principaux et focaux du système centré qu'il constitue, et en faisant ensuite la construction des images ; mais il est utile de suivre la réfraction à travers les diverses lentilles constituant, si l'on veut se rendre compte du rôle joué par les diverses parties de l'instrument.

Un microscope, réduit à ses parties essentielles, se compose de deux lentilles qui peuvent être regardées comme minces : l'une, très convergente et placée du côté de l'objet, porte le nom d'*objectif*, tandis que l'autre, placée du côté de l'œil observateur, est désignée sous le nom d'*oculaire*.

L'objet à examiner AB (fig. 313) doit être placé très près du pre-

mier plan focal de l'objectif U , mais au delà de ce plan; l'objectif en donne alors une image $A'B'$ réelle, agrandie et renversée que l'observateur regarde à travers l'oculaire LL' , en utilisant cette lentille comme loupe. En général donc, le cas d'un observateur hypermétrope étant mis à part, l'image définitive $A''B''$ sera virtuelle et renversée par rapport à l'objet AB .

Les considérations que nous avons présentées sur le grossissement à propos de la loupe (§ 476) sont de tous points applicables au microscope composé.

Soient, en effet, H et H' , Φ et Φ' (fig. 314), les points principaux

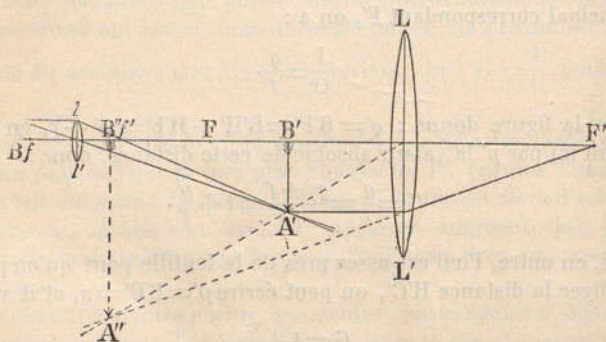


Fig. 313. — Microscope composé.

et focaux du système constitué par l'objectif et l'oculaire, P l' la droite, parallèle à l'axe, qui limite l'objet de grandeur invariable, et $I'B''$ la caractéristique de l'image. On voit immédiatement que, comme pour la loupe :

1° Si l'œil observateur est en C , au delà du point focal Φ' , le diamètre apparent $A'CB'$, $A''CB''$, $A'''CB'''$,... de l'image est d'autant plus grand que cette image se forme plus loin. Le grossissement sera donc maximum, pour un observateur, lorsque l'image se formera au remotum ;

2° Dans le cas où l'œil est au point focal Φ' , le diamètre apparent de l'image, et par suite le grossissement, sont constants, quelle que soit la position de l'image ;

3° Lorsque l'œil observateur est en C' , en deçà du point focal Φ' , le diamètre apparent $A'CB'$, $A''CB''$, $A'''CB'''$, est d'autant plus grand que l'image se forme plus près ; un observateur réalisera

donc alors le grossissement maximum qu'il peut obtenir en faisant former l'image à son proximum ;

4° Toutes choses égales d'ailleurs, la valeur maximum du grossissement est plus grande lorsque l'œil est situé en deçà du point focal Φ' , et plus loin de ce point focal ; c'est donc en deçà de Φ' qu'il vaudra mieux placer l'œil, si la chose est possible, c'est-à-dire si le point focal Φ' est situé assez au delà de l'oculaire de l'instrument. Jusqu'à aujourd'hui, les constructeurs ne se sont pas préoccupés de rendre possible cette position de l'œil observateur et d'augmenter par ce moyen le grossissement du microscope.

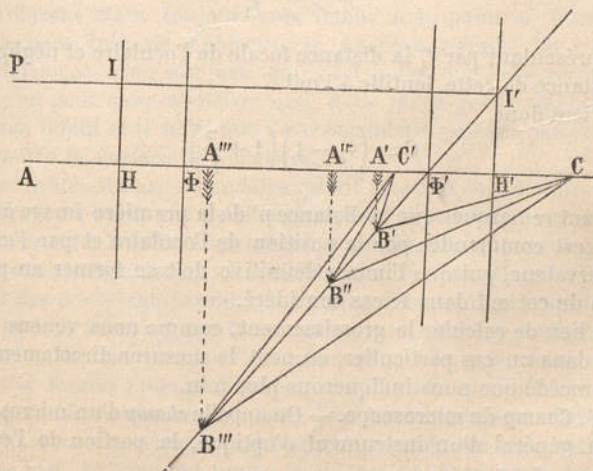


Fig. 314. — Des diverses valeurs que peut présenter le grossissement d'un microscope suivant la position de l'œil observateur.

Dans le cas particulier où l'image définitive $A''B''$ (fig. 313) se forme au proximum de l'œil observateur, il est facile de déterminer la valeur du grossissement en fonction des distances focales de l'objectif et de l'oculaire. On a en effet dans ce cas :

$$G = \frac{1}{0} = \frac{A'B''}{AB} = \frac{A'B'}{AB} \times \frac{A''B''}{A'B'}$$

L'objectif se comportant comme un appareil de projection et l'oculaire comme une loupe, les rapports $\frac{A'B'}{AB}$ et $\frac{A''B''}{A'B'}$ représen-

tent respectivement le grossissement g de l'objectif et le grossissement g' de l'oculaire.

Or, on a pour g (§ 474) :

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

f désignant la distance focale de l'objectif.

On a de même, pour la loupe oculaire (§ 476) :

$$g' = 1 + \frac{\pi}{f_1},$$

en représentant par f_1 la distance focale de l'oculaire et négligeant la distance de cette lentille à l'œil

Il vient donc

$$G = \left(\frac{p'}{f} - 1\right) \left(1 + \frac{\pi}{f_1}\right).$$

Il faut remarquer que la distance p' de la première image à l'objectif est commandée par la position de l'oculaire et par l'œil de l'observateur, puisque l'image définitive doit se former au maximum de cet œil dans le cas considéré.

Au lieu de calculer le grossissement, comme nous venons de le faire dans un cas particulier, on peut le mesurer directement par un procédé que nous indiquerons plus loin.

478. **Champ du microscope.** — On appelle *champ* d'un microscope, et en général d'un instrument d'optique, la portion de l'espace

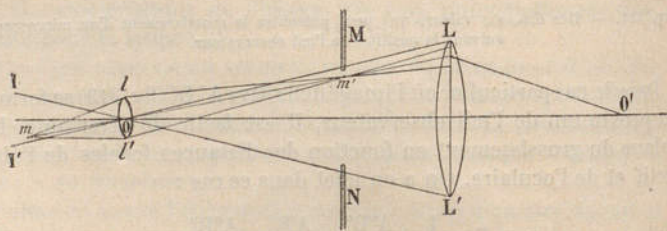


Fig. 315. — Champ du microscope.

rendue visible par l'emploi de cet instrument. Dans le microscope réduit à deux lentilles, l'objectif et l'oculaire, le champ est très sensiblement limité par la seconde nappe IOI' (fig. 315) d'un cône

qui aurait pour sommet le centre optique O de l'objectif et pour base le contour LL' de l'oculaire.

Si l'on considère, en effet, un point quelconque m situé en avant de l'objectif, tous les rayons qui, issus de ce point, rencontrent l'objectif, sont évidemment compris dans le cône ayant pour sommet le point m et pour base le contour ll' de l'objectif; les rayons réfractés correspondants seront de même compris dans un cône ayant pour base le même contour ll' et pour sommet l'image m' du point m ; donc il faut et il suffit, pour que le point m soit visible, que ce faisceau réfracté rencontre l'oculaire LL' . Mais, l'ouverture de l'objectif étant toujours très faible et le point m' étant toujours assez loin de l'objectif, le faisceau réfracté se confond sensiblement avec son axe qui n'est autre que l'axe secondaire mm' ; on peut donc admettre que, pour qu'un point soit dans le champ, il faut et il suffit que l'axe secondaire passant par ce point rencontre la surface de l'oculaire.

En réalité, si l'axe secondaire relatif au point m rencontre l'oculaire près du bord, une portion seulement du faisceau réfracté rencontrera cette lentille et le point m paraîtra moins éclairé que les points voisins du champ. Si l'on veut que tous les points de l'image aient des éclats comparables aux points correspondants de l'objet, il faut donc éliminer ces faisceaux réfractés qui ne tombent que partiellement sur l'oculaire. On place pour cela, dans la région où vient se former l'image fournie par l'objectif, un diaphragme MN percé d'une ouverture circulaire dont le diamètre soit un peu inférieur à celui de la section droite que présente, en cette région, la nappe LOL' du cône qui limite le champ. Ce diaphragme borde le champ d'un cercle bien net et diminue en outre les aberrations en supprimant les rayons trop obliques.

Si l'on considère les axes secondaires de l'objectif passant par les différents points du champ, on voit que les rayons lumineux dirigés suivant ces axes iront tous, après réfraction par l'oculaire, et en négligeant l'aberration de sphéricité de cette lentille, passer par un point O' qui est l'image, donnée par l'oculaire, du point O où se sont coupés tous ces rayons. Le point O' a reçu le nom de *point oculaire*, parce que c'est en ce point que doit se placer un œil pour embrasser simultanément tout les points du champ.

Tous les rayons incidents issus des divers points du champ passant par la lentille objective, les rayons réfractés devront évidemment, après avoir traversé l'oculaire, passer tous par l'image que

cet oculaire donne de l'objectif. C'est dans ce petit cercle, appelé *anneau oculaire* et dont le plan est perpendiculaire en O' à l'axe principal, que se trouve répartie sur la plus petite surface la lumière qui a traversé le microscope. Il ne faut pas que le diamètre de l'anneau oculaire soit plus grand que celui de la pupille, si l'on veut que toute cette lumière puisse pénétrer dans l'œil.

479. — **Oculaires. Lentille de champ.** — L'oculaire des microscopes tels qu'on les construit aujourd'hui est constitué, non par une lentille unique, mais par une association de lentilles.

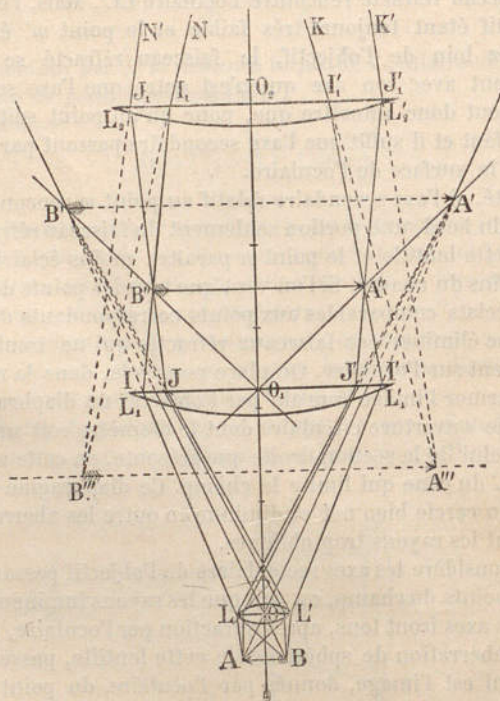


Fig. 316. — Rôle de la lentille de champ dans le microscope.

On emploie en général une disposition imaginée par Huyghens et qui consiste dans l'adjonction à la lentille oculaire $L_2L'_2$ (fig. 316), lentille plan-convexe dont la face plane est tournée vers l'observateur, d'une seconde lentille plan-convexe tournée dans le même

sens ; cette seconde lentille $L_1L'_1$ que l'on regarde comme faisant partie de l'oculaire parce qu'elle est fixée dans la même monture, mais qui, au point de vue optique, fait plutôt partie de l'objectif, doit être placée entre l'objectif LL' et le point où viendrait se former, si $L_1L'_1$ n'existait pas, l'image réelle $A'B'$ donnée par cet objectif. La lentille $L_1L'_1$, grâce à son pouvoir convergent, substitue à l'image $A'B'$ une image plus petite $A''B''$; elle ramène près de l'axe les rayons qui s'en écartaient, si bien que des rayons qui ne tombaient pas sur la lentille oculaire $L_2L'_2$ (ceux par exemple qui concouraient aux points A' et B' de l'image donnée par l'objectif), peuvent maintenant la rencontrer. La lentille $L_1L'_1$ augmente donc le champ de l'instrument, d'où son nom de *lentille de champ* ou de *lentille collectrice*.

On voit que l'adjonction de la lentille de champ diminue le grossissement, puisqu'elle substitue à l'image $A'B'$ une image plus petite $A''B''$; mais en revanche dans l'oculaire composé, dit *negatif*, que nous venons de décrire et qui est constitué par la lentille de champ et la lentille oculaire, les aberrations de sphéricité sont, on peut le démontrer, moindres que dans un oculaire simple qui donnerait le même grossissement. La lentille de champ a encore pour effet, comme nous le verrons (§ 500) lors de l'étude de l'achromatisme, de faire disparaître ou du moins de diminuer, dans les images perçues par l'observateur, les irisations que peuvent présenter les images fournies par l'objectif.

480. **Objectifs.** — *a.* — L'image réelle fournie par l'objectif devant se former à une distance commandée par la position de l'oculaire et par l'état de vision de l'observateur, il y aura avantage, au point de vue des dimensions de cette image et, toutes choses égales d'ailleurs, au point de vue du grossissement, à employer un objectif de distance focale très petite. Pour diminuer la distance focale sans augmenter les aberrations de sphéricité, on a recours à l'association de plusieurs lentilles.

Il faut en outre que les images données par l'objectif soient, autant que possible, dépourvues d'irisation ; on obtient ce résultat, comme nous le verrons dans un autre Chapitre, par l'emploi de lentilles spéciales dites *achromatiques*, ou de lentilles ordinaires convenablement choisies et convenablement disposées.

Les objectifs destinés aux forts grossissements sont donc constitués par l'association de plusieurs lentilles achromatiques (Leibniff) ou de plusieurs lentilles ordinaires (Amici). La lentille la plus rapprochée de l'objet porte le nom de *lentille frontale*.

Il est fort difficile, dans la pratique, de *corriger* rigoureusement les aberrations de l'objectif, et les images sont bordées de rouge ou de bleu, déformées dans un sens ou dans un autre, suivant que l'objectif présente un déficit ou un excès de *correction*. Aussi fait-on en sorte que les aberrations de l'objectif soient, autant que possible, compensées par celles de l'oculaire.

b. — Les conditions dans lesquelles on se place pour examiner les objets au microscope influent du reste sur la correction de l'aberration de sphéricité des objectifs. L'objet, placé sur une lame de verre assez épaisse, ou *porte-objet*, est en effet recouvert d'une lame de verre plus mince, ou *couvre-objet*, que doivent traverser les rayons lumineux avant de rencontrer l'objectif. Les rayons

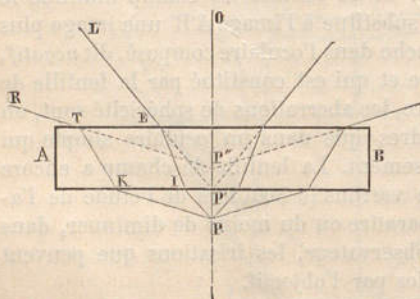


Fig. 317. — Action perturbatrice de la lame couvre-objet sur l'homocentricité des rayons lumineux.

issus d'un même point P de l'objet (fig. 317) paraîtront par suite, après réfraction par cette lame, provenir de points P', P''... d'autant plus relevés, pour une même lame, que les rayons considérés seront plus obliques, et, pour une même direction des rayons, que la lame sera plus épaisse. Pour donner des images

nettes, l'objectif devra en conséquence faire concourir en un même point les rayons qui paraissent provenir des points distincts P', P''...

On conçoit que les positions relatives qu'il est nécessaire de donner aux lentilles de l'objectif pour obtenir ce résultat soient variables avec l'épaisseur du couvre-objet, au moins lorsque le grossissement est considérable. Aussi les lentilles de l'objectif sont-elles quelquefois mobiles les unes par rapport aux autres, de telle sorte que l'observateur puisse, au moment d'une observation, en faire varier la distance et rendre ainsi les images le plus net possible. De tels objectifs portent le nom d'*objectifs à correction*.

c. — On donne toujours à la lentille *frontale* des objectifs employés pour les forts grossissements une ouverture très petite, afin de diminuer l'obliquité des rayons incidents et par suite l'aberration de sphéricité. Mais en raison même de cette faible ouverture,

en raison aussi de la réflexion de la lumière sur la lentille frontale et de la répartition de la lumière transmise sur la grande surface de l'image définitive, cette image est peu éclairée.

On remédie à cet inconvénient au moyen d'une disposition imaginée par Amici et qui consiste dans l'interposition, entre la lamelle couvre-objet et la lentille frontale de l'objectif, d'une goutte d'un liquide, l'eau par exemple, dont l'indice diffère peu de celui du verre. Les rayons qui ont traversé la lamelle s'écartent alors moins de l'axe que s'ils cheminaient dans l'air; un plus grand nombre de ces rayons tombe par suite sur l'objectif et, comme il y a en outre moins de pertes par réflexion au niveau de la surface d'entrée de la lentille frontale, l'image obtenue est mieux éclairée.

Les objectifs spécialement construits pour être utilisés dans ces conditions portent le nom d'*objectifs à immersion*; ils permettent d'obtenir des grossissements considérables avec une intensité lumineuse suffisante.

L'emploi des objectifs à immersion permet en outre, toutes choses égales d'ailleurs, de placer l'objet à une plus grande distance de la lentille frontale ou, pour une même distance, de faire usage de lentilles à plus court foyer.

481. **Description du microscope composé.** — Le corps du microscope est constitué par un tube ⁽¹⁾ cylindrique en laiton BC (fig. 348) dont la partie supérieure peut recevoir un oculaire C, tandis que sur la partie inférieure B peut se visser, soit un objectif, soit une monture spéciale, dite monture *à revolver*, portant 2 ou 3 objectifs qu'un simple mouvement de rotation permet d'amener successivement dans l'axe du tube. Le corps du microscope pénètre à frottement dans une gaine de laiton qui peut glisser le long d'une colonne reliée au pied de l'instrument ⁽²⁾. Les déplacements de la gaine le long de cette colonne peuvent s'obtenir, à volonté, par l'intermédiaire d'une crémaillère et d'un pignon A, ou par celui d'un écrou et d'une vis à pas très fin, dite *vis micrométrique*. En agissant sur le pignon, on peut imprimer à la gaine, et par suite au corps du microscope, des déplacements rapides et étendus qui permettent de réaliser une mise au point approximative; en agissant ensuite sur

(1) Il y a souvent deux tubes pouvant glisser à frottement l'un dans l'autre, ce qui permet de faire varier à volonté la distance de l'oculaire à l'objectif et par suite le grossissement.

(2) Dans certains modèles appelés *microscopes inclinants* cette liaison se fait par une articulation mobile autour d'un axe horizontal.

la tête de la vis micrométrique, on déplace lentement le corps du microscope, ce qui permet d'achever la mise au point. Au-dessous du corps du microscope, et fixée sur la même colonne, se trouve la

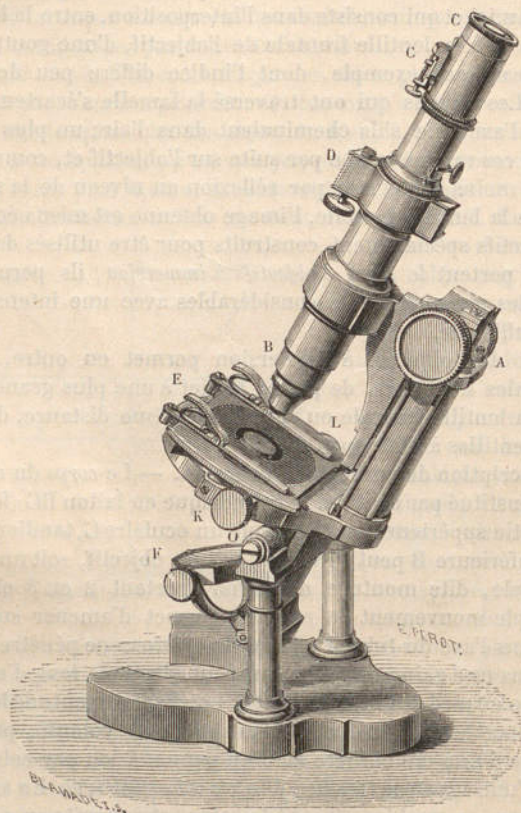


Fig. 318. — Microscope.

platine E, sorte de plateforme percée en son centre d'une ouverture circulaire et destinée à supporter les préparations microscopiques à examiner. Deux petites pinces à ressorts, dites *pinces-valets*, maintiennent ces objets en place. Au-dessous de la platine est disposé un petit miroir O, mobile dans tous les sens de façon à pouvoir

diriger de bas en haut, sur la préparation, la lumière d'une lampe ou des nuées. Pour les forts grossissements, on peut encore concentrer la lumière sur la préparation à l'aide d'un système de lentilles qui se fixe sous la platine. Les objets opaques s'éclairent par dessus avec une grande lentille convergente à court foyer.

482. **Choix et qualités d'un microscope.** — Le grossissement, que nous apprendrons tout à l'heure à mesurer, ne suffit pas pour renseigner sur la valeur d'un microscope; il faut encore tenir compte de diverses qualités que cet instrument peut présenter à un degré plus ou moins élevé, suivant le soin apporté à sa construction.

Il faut d'abord que les détails et les contours de l'image fournie par le microscope présentent une grande netteté. Le degré de cette netteté, qui dépend de la façon dont les aberrations ont été corrigées, constitue le *pouvoir définissant* du microscope. On ne saurait mesurer ce pouvoir, mais chacun doit l'apprécier, lorsqu'il fait choix d'un microscope, en soumettant l'instrument, par exemple aux essais suivants :

Examiner un objet présentant des parties très nettement délimitées, tel que l'image d'une croisée donnée par un globule de mercure; cette image, regardée dans le microscope, doit conserver sa netteté, et doit disparaître pour de faibles changements dans la mise au point ;

Examiner un objet présentant des lignes claires très fines sur fond sombre, après avoir recouvert la moitié de l'objectif d'une feuille d'un corps opaque, d'étain par exemple; on rend ainsi plus sensibles les phénomènes d'irisation des images si les aberrations de l'objectif sont imparfaitement corrigées et la perception d'un défaut dans cette correction est par suite facilitée ;

Examiner un réseau à mailles carrées excessivement fines; l'image de ce réseau paraîtra plane si les aberrations de sphéricité sont bien corrigées, elle paraîtra bombée ou excavée s'il y a déficit ou excès de correction.

Mais il ne suffit pas que les images soient nettes, il faut encore que l'on puisse apercevoir le plus de détails possible à la surface d'un objet. Ces détails, constitués par des stries, des aspérités, des ouvertures, etc... sont rendus visibles grâce à la pénétration dans l'objectif de rayons obliques qui produisent de véritables ombres portées. Cette qualité du microscope, qui a reçu le nom de *pouvoir résolvant*, exige l'emploi d'objectifs d'ouverture angulaire assez

grande. On apprécie ce pouvoir en examinant des objets qui présentent des détails très fins, par exemple l'enveloppe siliceuse de certaines *diatomées* (végétaux microscopiques de la famille des algues) et en comparant l'image fournie par le microscope à essayer à celle que donne un bon microscope ou à une bonne photographie microscopique.

Enfin, on appelle *pouvoir pénétrant* d'un microscope la propriété qui permet de saisir simultanément les détails situés à des profondeurs différentes dans un objet. Il faut, pour obtenir ce résultat, éliminer les rayons obliques qui exagèrent les différences de plans des images des points situés à des profondeurs différentes, et par suite employer des objectifs de faible ouverture. Cette qualité est donc incompatible avec la précédente, qu'il faut d'ailleurs lui préférer.

483. **Mesure du grossissement. Micromètre objectif. Chambre claire.** — Nous avons vu que la valeur du grossissement était, dans tous les cas, donnée par la formule :

$$G = \frac{l}{O} \times \frac{\pi}{d}$$

Or π a, pour un même observateur, une valeur fixe et facile à déterminer ; il suffit donc, pour déterminer G , de prendre un objet de dimensions connues O et de mesurer la grandeur l de son image et la distance d de cette image à l'œil.

On prend généralement comme objet une lame de verre sur laquelle sont gravés une série de traits distants l'un de l'autre de $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{500}$... de millimètre. Cette lame, qui doit se placer sur la platine au-dessous de l'objectif, porte le nom de *micromètre objectif*.

Pour mesurer l et d on a recours à une *chambre claire*. On appelle ainsi un petit instrument qui permet de faire former sur une feuille de papier placée à côté du microscope, et par suite de dessiner, l'image virtuelle fournie par l'instrument.

Il existe un grand nombre de modèles différents de chambres claires. Nous ne décrivons ici que celle de Nachet (fig. 349) qui est l'une des plus employées. Elle se compose d'un prisme dont la section $degh$ est un parallélogramme et dont les angles aigus d et g ont 45° . Sur la petite face gh qui se place au-dessus de l'ocu-

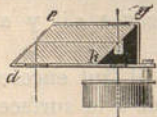


Fig. 349. — Chambre claire de Nachet.

laire, est collé un petit cylindre de verre dont la base inférieure est horizontale comme la face eg , de sorte que les rayons qui émergent du microscope traversent le cylindre et le prisme sans déviation puisqu'ils tombent normalement sur la base inférieure du cylindre et qu'ils sortent normalement par la face eg du prisme. Par contre les rayons qui, venant du papier placé à côté du microscope, rencontrent la face dh , éprouvent sur les faces obliques ed et gh deux réflexions totales qui les renvoient verticalement de bas en haut dans la même direction que les précédents. Il en résulte que l'observateur, dont l'œil est placé au-dessus de la face eg près de g , aperçoit superposées l'image fournie par le microscope et celle de la feuille de papier, et peut donc facilement suivre les contours de l'image avec la pointe d'un crayon comme le représente la figure 320.

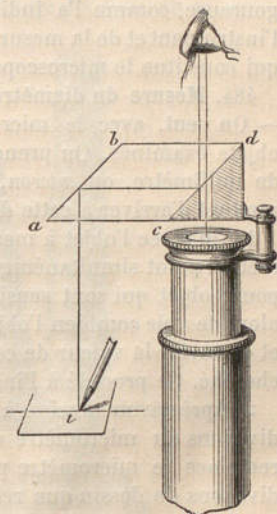


Fig. 320. — Chambre claire disposée pour dessiner un objet.

La mesure de l et de d s'effectue comme suit. On prend comme objet le micromètre objectif, et l'on dispose une feuille de papier à côté du microscope à la distance où se fait l'image nette des divisions du micromètre ⁽¹⁾. On trace alors, en coïncidence avec ces images, des traits au crayon dont la distance fait connaître l ; la distance de la feuille de papier à l'œil fait d'ailleurs connaître d ⁽²⁾. On peut encore mesurer l directement en substituant à la feuille de pa-

⁽¹⁾ Pour cela il suffit de tracer sur la feuille de papier quelques traits parallèles aux images des divisions du micromètre et de déplacer légèrement l'œil au-dessus de la chambre claire, tout en observant le sens du déplacement de ces images par rapport aux traits tracés sur le papier (*effets de parallaxe*). Si les images des divisions paraissent se déplacer en sens inverse de l'œil, la feuille de papier est plus éloignée que ces images; elle est plus rapprochée au contraire si l'inverse se produit. Lorsqu'on n'observe dans ces conditions aucun déplacement apparent, le papier est dans le plan où se forme l'image du micromètre.

⁽²⁾ Il faut tenir compte, pour évaluer d , du chemin parcouru par la lumière à l'intérieur de la chambre claire.

pier une échelle graduée ; d est dans ce cas la distance de l'échelle à l'œil. Il importe de remarquer que la valeur ainsi trouvée pour G ne correspond rigoureusement qu'aux circonstances dans lesquelles les mesures ont été effectuées.

La valeur du grossissement peut se déduire d'une façon plus rigoureuse, comme l'a indiqué Gariel, des conditions d'emploi de l'instrument et de la mesure de la distance focale du système centré qui constitue le microscope.

484. **Mesure du diamètre réel des objets. Micromètre oculaire.** — On peut, avec le microscope, mesurer la grandeur des petits objets examinés. On prend généralement pour unité le millièment de millimètre, ou *micron*, qui se note μ . Plusieurs procédés permettent d'arriver à cette détermination.

1° On place l'objet à mesurer sur le micromètre objectif, et l'on met au point simultanément pour les divisions du micromètre et pour l'objet qui sont sensiblement dans le même plan. Il suffit alors de voir combien l'objet recouvre de divisions du micromètre et de savoir la valeur de ces divisions, pour connaître le diamètre cherché. Ce procédé a l'inconvénient de détériorer le micromètre.

2° Après avoir dessiné à l'aide d'une chambre claire (§ 483) les divisions du micromètre objectif sur une feuille de papier ⁽¹⁾, on remplace le micromètre par l'objet et l'on cherche le nombre de divisions du dessin que recouvre l'image de cet objet. Ce nombre représente, en centièmes de millimètres si le micromètre est au centième, le diamètre réel de l'objet. En effet, si rien n'a été changé aux conditions d'emploi de l'instrument et à la position de la feuille de papier, le grossissement est le même dans les deux cas, et le procédé revient à mesurer l'image agrandie de l'objet avec l'image, agrandie dans le même rapport, d'une échelle au centième de millimètre.

3° On fait usage d'un second micromètre dit *micromètre oculaire*, qui est constitué par une petite lame de verre divisée généralement en dixièmes de millimètre et placée, entre la lentille de champ et la lentille oculaire, au point même où se forment les images réelles données par l'ensemble de l'objectif et de la lentille de champ ⁽²⁾.

(1) Il est inutile, dans ce cas, de placer exactement la feuille de papier au point où se forme l'image des divisions, pourvu qu'on laisse la feuille de papier dans la même position pendant toutes les déterminations.

(2) Le micromètre oculaire est en général mobile pour qu'on puisse

On détermine ainsi d'abord le nombre n de divisions du micromètre oculaire que recouvre l'image de l'objet, puis le nombre n' de divisions du même micromètre oculaire que recouvre l'image d'une division du micromètre objectif. Le rapport $\frac{n}{n'}$, représente alors le diamètre de l'objet en prenant pour unité une division du micromètre objectif.

485. **Divers modèles de microscopes.** — Ils sont fort nombreux, nous ne décrirons ici que les principaux.

a. — On interpose parfois, entre l'objectif et l'oculaire un prisme à réflexion totale (fig. 282 page 589) de façon à renvoyer horizontalement les rayons qui cheminent verticalement à leur sortie de l'objectif; l'axe principal de l'oculaire doit être alors horizontal. Ce modèle, usité surtout pour la photographie microscopique, porte le nom de *microscope horizontal*.

b. — L'image fournie par les microscopes ordinaires est renversée par rapport à l'objet. On peut redresser cette image par l'adjonction à l'instrument d'un second objectif qui donne une image réelle, et renversée une seconde fois, de l'image réelle et déjà renversée fournie par le premier. L'image perçue a ainsi subi deux renversements successifs et se trouve droite par rapport à l'objet; le microscope est alors dit *pancratique*. On peut encore redresser

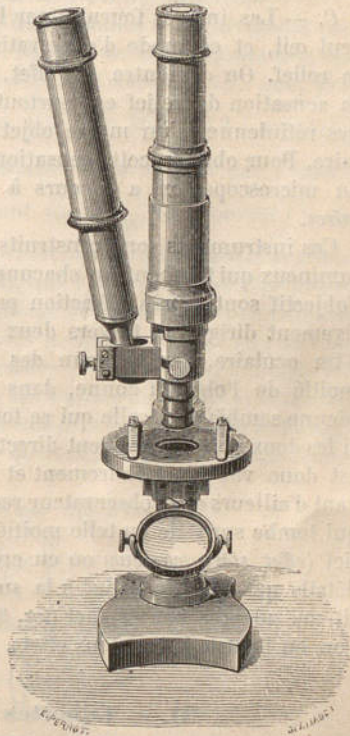


Fig. 321. — Microscope binoculaire de Nachet.

l'amener exactement dans cette position en profitant des effets de parallaxe (voir note, page 669).

l'image en interposant, sur le trajet des rayons, deux prismes à réflexion totale dont les deux faces hypothénuses, parallèles à la direction de ces rayons, sont perpendiculaires entre elles. Chaque prisme renversant l'image dans un plan perpendiculaire à ses arêtes, l'image apparaît droite par rapport à l'objet. Nachet remplace les deux prismes par un prisme unique à base oblique qui produit le même effet.

C. — Les images fournies par le microscope sont vues avec un seul œil, et ce mode d'observation ne permet pas de percevoir le relief. On démontre en effet, en Optique physiologique, que la sensation de relief est surtout due à la dissymétrie des images rétinienne d'un même objet, c'est-à-dire à la vision binoculaire. Pour obtenir cette sensation au moment d'une observation au microscope, on a recours à l'emploi de *microscopes binoculaires*.

Ces instruments sont construits de telle sorte que les faisceaux lumineux qui tombent sur chacune des moitiés droite et gauche de l'objectif sont, après réfraction par cet objectif, isolés et respectivement dirigés, à travers deux tubes différents munis chacun d'un oculaire, dans chacun des yeux de l'observateur. Chaque moitié de l'objectif donne, dans ces conditions, une image rétinienne semblable à celle qui se formerait sur chacune des rétines, si les deux yeux regardaient directement l'objet. L'image définitive est donc vue binoculairement et le relief est dès lors perçu. Suivant d'ailleurs que l'observateur recevra dans chaque œil la lumière qui tombe sur telle ou telle moitié de l'objectif, il apercevra en relief (*effet stéréoscopique*) ou en creux (*effet pseudoscopique*) ⁽¹⁾ les détails qui sont en relief à la surface de l'objet. Une des dispositions adoptée par Nachet (fig. 321) permet d'obtenir à volonté l'un ou l'autre de ces deux effets.

III. — Lunettes et télescopes.

486. **Grossissement dans les lunettes et les télescopes.** — Ces instruments sont destinés à regarder des objets situés à une distance plus ou moins grande mais invariable, et fournissent des

⁽¹⁾ A cause du renversement de l'image, il faut, pour obtenir l'effet stéréoscopique, faire arriver dans l'œil droit le faisceau provenant de la moitié gauche de l'objectif, et réciproquement. C'est l'inverse pour l'effet pseudoscopique.

images dont le diamètre apparent est supérieur à celui de l'objet correspondant.

L'objectif, qui donne une image réelle de l'objet, est constitué par une lentille convergente dans les *lunettes*, par un miroir concave dans les *télescopes*; l'oculaire, qui est dans tous les cas une lentille ou un système de lentilles, donne une image définitive virtuelle si on laisse de côté le cas de l'œil hypermétrope.

L'objet étant toujours placé à une distance D relativement considérable, l'image qu'en donne l'objectif se fait toujours très sensiblement dans le second plan focal de cet objectif, que, pour fixer les idées, nous supposerons être une lentille. Le rapport $\frac{I}{O}$ des dimensions linéaires de l'image réelle fournie par l'objectif et de l'objet est donc sensiblement égal à $\frac{f}{D}$, en appelant f la distance focale de l'objectif; ce rapport est par suite d'autant plus grand, pour une même valeur finie de D , que f est lui-même plus grand.

Dans un même instrument, l'image réelle donnée par l'objectif se fait dans une position à peu près invariable (plan focal de l'objectif); pour que chaque observateur puisse amener l'image virtuelle fournie par l'oculaire dans les limites de sa vision distincte, il est dès lors nécessaire que la distance de l'oculaire à l'image réelle puisse varier, c'est-à-dire que l'oculaire soit mobile, indépendamment de l'objectif.

Le grossissement d'une lunette est (3, § 473) :

$$G = \frac{1}{O} \times \frac{D}{a};$$

on peut évidemment le mettre sous la forme :

$$G = \frac{I}{O} \times \left(\frac{1}{I} \times \frac{D}{a} \right)$$

et l'on voit, d'après ce qui précède, que l'on peut le considérer comme le produit de deux facteurs : l'un, $\frac{I}{O}$, fixe pour un même instrument, représente le rapport des dimensions linéaires de l'objet O et de l'image I fournie par l'objectif; l'autre, $\frac{1}{I} \times \frac{D}{a}$, variable suivant les conditions d'emploi de l'instrument, représente le grossissement que donne l'oculaire d'un objet (l'image I) dont

on peut faire varier à volonté la distance à l'oculaire, mais qui ne pourrait être vu directement qu'à la distance D .

Le grossissement d'une lunette ou d'un télescope donnerait donc lieu à une discussion analogue à celle que nous avons faite à propos des microscopes en général. Nous nous bornerons, dans ce qui va suivre, à décrire sommairement les lunettes et les télescopes.

487. **Lunette astronomique.** — L'objectif de cette lunette, dont le nom indique l'usage, est constitué par une lentille convergente L (fig. 322) qui doit avoir une surface aussi grande que possible, afin d'augmenter la largeur du faisceau sensiblement parallèle (l'objet étant très éloigné) recueilli par l'instrument, et d'obtenir ainsi une image $A'B'$ plus éclairée, c'est-à-dire de donner plus de

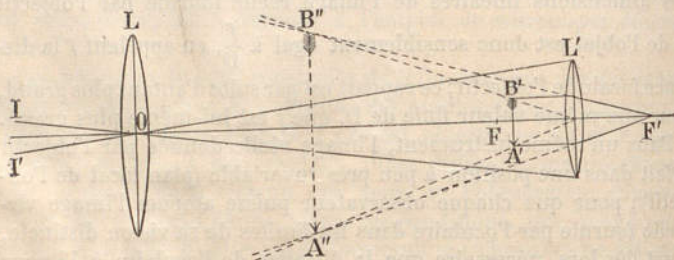


Fig. 322. — Lunette astronomique.

clarté à la lunette. Cette image $A'B'$ donnée par l'objectif est réelle, renversée par rapport à l'objet et située sensiblement dans le second plan focal de l'objectif; on la regarde à travers une seconde lentille convergente L' qui fonctionne comme loupe, ou à travers un oculaire composé, tel par exemple que celui que nous avons décrit à propos du microscope. Que l'oculaire soit simple ou composé, on obtient de l'image réelle $A'B'$ une image virtuelle $A''B''$ droite par rapport à $A'B'$ et par suite renversée par rapport à l'objet. L'objectif ayant forcément, à cause de sa grande surface, de grands rayons de courbure et une grande distance focale, et l'image réelle fournie par l'objectif devant, d'autre part, se former entre la lentille oculaire et son premier foyer F , cette lentille oculaire devra être placée assez loin de l'objectif. Aussi les lunettes astronomiques sont-elles relativement fort longues.

Il est facile de voir, par un raisonnement analogue à celui que nous avons fait à propos du microscope, que le champ de la lunette

réduite à deux lentilles (fig. 322) est sensiblement limité par la seconde nappe d'un cône qui aurait pour sommet le centre optique O de l'objectif et pour base le contour de l'oculaire. Pour limiter le champ aux points dont les faisceaux incidents tombent en entier sur l'oculaire, il faut encore placer un diaphragme d'ouverture convenable dans le plan où se fait l'image réelle fournie par l'objectif, c'est-à-dire dans le second plan focal de cet objectif.

Ce diaphragme porte en général un *réticule* formé par deux fils fins dont le point d'entrecroisement est sur l'*axe optique* de la lunette. Lorsqu'on a amené l'image d'un point lumineux au point d'entrecroisement des fils du réticule, le point lumineux se trouve évidemment sur l'axe optique. De là un procédé pour déterminer, avec une lunette, la distance angulaire de deux points, en mesurant l'angle dont il faut faire tourner l'instrument pour amener successivement les deux points en coïncidence avec l'entrecroisement des fils du réticule.

Comme dans le microscope, le plan où la lumière qui a traversé la lunette se trouve répartie sur la plus petite surface, est celui où se forme l'image réelle de l'objectif donnée par l'oculaire ; cette surface minima est l'*anneau oculaire*. C'est au niveau de cet anneau qu'un observateur doit placer sa pupille pour recevoir dans l'œil le maximum de lumière et embrasser tous les points du champ.

488. **Lunette terrestre.** — Elle ne diffère de la lunette astronomique que par son objectif, dont la surface est généralement moindre, et par l'adjonction, entre l'objectif et l'oculaire, d'un système de deux lentilles convergentes disposées de façon à donner une image réelle et renversée de l'image réelle et déjà renversée que l'objectif donne de l'objet. C'est cette nouvelle image, droite par rapport à l'objet et égale en grandeur à celle que donne directement l'objectif, que l'on regarde à travers un oculaire simple ou composé. Les objets sont ainsi vus dans leur position naturelle, ce qui est important pour l'observation des objets terrestres. Les deux lentilles convergentes auxiliaires et l'oculaire constituent ce que l'on appelle un *oculaire terrestre*.

489. **Lunette de Galilée.** — L'objectif est encore une lentille convergente L (fig. 323) qui donnerait, un peu au delà mais très près de son second plan focal, une image réelle et renversée AB' de l'objet si les rayons qui vont former cette image ne rencontraient l'oculaire ; celui-ci est constitué par une lentille diver-

gente L' disposée de telle sorte que sa distance à l'image réelle $A'B'$, que donnerait l'objectif, soit supérieure à sa distance focale principale OF (1) et inférieure au double de cette distance. On sait que, dans ces conditions, l'image réelle $A'B'$ fournie par l'objectif jouant

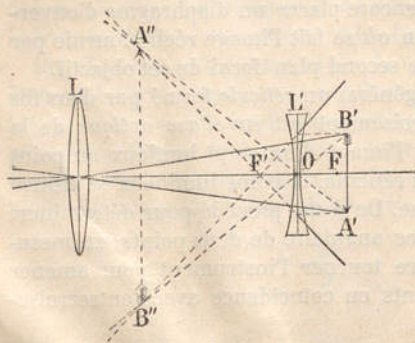


Fig. 323. — Lunette de Galilée.

par rapport à l'oculaire le rôle d'un objet virtuel, l'oculaire en donnera une image virtuelle, renversée et agrandie $A''B''$. Cette image sera donc droite par rapport à l'objet. De plus cette image se déplacera, en augmentant de dimensions, depuis le second plan antiprincipal de l'oculaire jusqu'à l'infini, si l'image qui joue le rôle d'objet virtuel se déplace

depuis le premier plan antiprincipal de l'oculaire jusqu'à son premier plan focal.

Il suffira donc, pour amener l'image dans les limites de la vision distincte de l'observateur, de déplacer l'oculaire par rapport à l'objectif. L'objectif et l'oculaire sont à cet effet montés aux extrémités opposées de deux tubes qui peuvent glisser à frottement l'un dans l'autre.

On peut encore appeler anneau oculaire l'image de l'objectif fournie par l'oculaire. Cette image est ici virtuelle et l'œil ne peut par conséquent se placer au niveau de cet anneau. Le faisceau qui a traversé la lunette diverge à partir de l'oculaire et, comme le diamètre de cette lentille est toujours supérieur à celui de la pupille, l'œil ne peut jamais recevoir la totalité du faisceau qui émerge de la lunette.

La *lorgnette de spectacle* ou *jumelle* est constituée par deux lunettes de Galilée accouplées de manière à permettre la vision binoculaire.

490. Principe des télescopes. — Les télescopes sont destinés,

(1) Pour certaines vues (vues hypermétropes), cette distance peut cependant être inférieure à la distance focale principale.

comme les lunettes astronomiques, à l'observation des astres. L'objectif de ces instruments est constitué par un miroir concave MM' (fig. 324) qui forme le fond d'un tube métallique TT' de section assez large et qui donne, très sensiblement dans son plan focal, une image réelle et renversée $A'B'$ des objets très éloignés situés dans la direction de l'axe PC du tube. L'axe principal du miroir coïncidant, dans la plupart des modèles, avec l'axe du tube, l'image a précisément son centre sur ce dernier axe, si bien qu'on ne pourrait l'observer, en se plaçant sur le trajet des rayons réfléchis par le miroir, sans intercepter la majeure partie des rayons incidents. On a recours alors à divers artifices pour éviter cet inconvénient.

a. — Tantôt on interpose entre le miroir concave et l'image

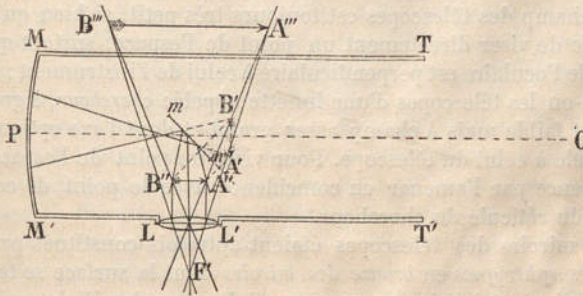


Fig. 324. — Télescope de Newton.

réelle $A'B'$ (fig. 324) une petite surface plane réfléchissante mm' inclinée à 45° sur l'axe commun au miroir objectif et au tube; cette surface constituée, soit par un petit miroir plan (télescope de Newton), soit par la face hypothénuse d'un prisme à réflexion totale (télescope de Foucault), donne une image réelle $A'B'$ symétrique de $A'B'$ qui joue le rôle d'objet virtuel (§ 388). Les rayons qui vont former cette nouvelle image $A''B''$ ont des directions sensiblement perpendiculaires à l'axe principal du miroir concave; on peut donc les recevoir dans un oculaire LL' qui est fixé sur la paroi du tube TT' , et qui donne de l'image $A''B''$ une image définitive, virtuelle, droite et agrandie $A''B'''$. Il faut d'ailleurs, pour la mise au point, que l'oculaire puisse, à la volonté de l'observateur, s'approcher ou s'éloigner de l'image $A''B''$. Dans le télescope de Foucault, l'oculaire est remplacé par un microscope.

b. — Tantôt on place en avant du miroir objectif, qui doit alors être percé d'une ouverture centrale, un petit miroir concave (téléscope de Grégory) ou convexe (téléscope de Cassegrain) dont l'axe principal coïncide avec celui du grand miroir objectif. La position de ce petit miroir est d'ailleurs telle qu'il fait former dans le voisinage de la surface du grand miroir une image réelle $A''B''$ de l'image $A'B'$; c'est cette nouvelle image $A''B''$ que l'on observe à travers un oculaire fixé dans l'ouverture centrale du miroir objectif.

Quelle que soit la disposition adoptée, la quantité de rayons incidents interceptés est toujours très faible à cause des petites dimensions du prisme ou du miroir auxiliaire, et l'image perçue présente ainsi une clarté suffisante malgré son fort grossissement.

Le champ des télescopes est toujours très petit, si bien qu'il est difficile de viser directement un point de l'espace, surtout quand l'axe de l'oculaire est perpendiculaire à celui de l'instrument; aussi munit-on les télescopes d'une lunette appelée *chercheur*, à grossissement faible mais à champ assez grand et dont l'axe optique est parallèle à celui du télescope. Pour viser un point de l'espace, on commence par l'amener en coïncidence avec le point de croisement du réticule du chercheur.

Les miroirs des télescopes étaient autrefois constitués par des miroirs *sphériques* en bronze des miroirs dont la surface se ternissait facilement à l'air; on ne pouvait leur rendre l'éclat primitif que par un nouveau polissage, qui pouvait altérer la régularité de leur surface et par suite la netteté des images. Foucault a substitué à ces miroirs des miroirs en verre, argentés sur la face qui reçoit la lumière; il a indiqué en outre une méthode, dite des *retouches locales*, qui permet de donner à ces miroirs une forme *parabolique*. Ces miroirs sont ainsi aplanétiques pour les points situés à l'infini et donnent par suite des images beaucoup plus nettes que les miroirs sphériques; sans doute la surface argentée se ternit plus facilement que le bronze des miroirs, mais il est très facile de désargenter et de réargenter ces miroirs sans modifier en rien la forme de leur surface.

CHAPITRE V

DISPERSION

491. **Décomposition ou analyse de la lumière.** — Lorsque nous nous sommes occupés, dans les Chapitres précédents, du passage de la lumière d'un milieu dans un autre, nous avons toujours supposé implicitement que la lumière incidente était homogène, c'est-à-dire que toutes ses parties jouissaient des mêmes propriétés. Une lumière ainsi constituée, désignée sous le nom de lumière *simple* ou *monochromatique*, est rarement fournie par les sources lumineuses naturelles ou artificielles; la plupart des lumières émises par ces sources sont, en effet, comme Newton l'a montré le premier, des lumières *composées*, c'est-à-dire constituées par la superposition d'une infinité de rayons, ou mieux de *radiations* qui possèdent des caractères distinctifs.

Les phénomènes qui mettent hors de doute l'existence de lumières complexes sont connus sous le nom de phénomènes de *dispersion*; ils se produisent chaque fois qu'un faisceau de lumière composée change de direction en passant d'un milieu dans un autre; mais ils présentent leur maximum d'éclat lors du passage d'un tel faisceau à travers un prisme.

Si l'on interpose un prisme D (fig. 325) sur le trajet d'un petit faisceau R de rayons solaires, qui pénètre dans une chambre noire par une ouverture pratiquée dans le volet et qui irait former sur un écran convenablement placé une petite tache ronde de l'astre lumineux, on observe, non seulement une déviation du faisceau, mais une déformation de l'image. Cette image *oc*, à laquelle on a donné le nom de *spectre solaire*, est étalée dans un plan perpendiculaire aux arêtes du prisme et a la forme d'une bande lumineuse; cette bande présente en outre, dans ses diverses parties, des couleurs différentes qui se succèdent dans l'ordre suivant, en commençant par la couleur la plus déviée :

Violet, Indigo, Bleu, Vert, Jaune, Orangé, Rouge.

En réalité, les couleurs successives se fondent les unes dans les autres par degrés insensibles, de telle sorte qu'il y a, dans le spectre solaire, une infinité de nuances dont les couleurs citées ci-dessus sont en quelque sorte les divers types.

L'apparition de ces couleurs et leur ordre de succession étant

indépendants de la nature du prisme, de son angle de réfringence et de l'angle d'incidence des rayons, l'explication de ce phénomène de dispersion doit être cherché dans la nature même de la lumière ⁽¹⁾.

492. **Explication du spectre.** — Si l'on reçoit sur un prisme E (fig. 325), non plus un pinceau de lumière solaire, mais un pinceau de l'une des lumières qui constituent le spectre solaire, et que l'on place, par exemple, le prisme dans la position du minimum de déviation par rapport à la direction du faisceau incident, on constate que le faisceau incident n'est plus déformé ou dispersé, mais seulement dévié.

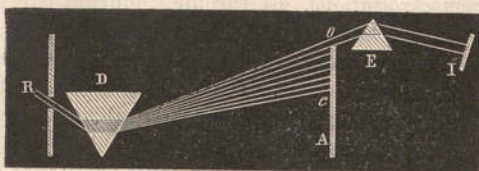


Fig. 325. — Dispersion par un prisme.

Cette déviation minima varie d'ailleurs, pour un même prisme, avec la couleur de la lumière sur laquelle porte l'expérience.

Or, nous avons vu (§ 421) que la déviation minima D imprimée par un prisme d'angle réfringent assez petit aux rayons qui le traversent est donnée par la formule :

$$D = (n - 1)A,$$

dans laquelle A est l'angle de réfringence du prisme et n l'indice de réfraction de la substance qui constitue le prisme par rapport à la lumière considérée. L'angle A restant constant et l'expérience montrant que D varie d'une couleur à l'autre, on doit conclure qu'un même milieu transparent possède des indices de réfraction différents pour les lumières de couleurs différentes, c'est-à-dire que ces lumières possèdent des réfrangibilités différentes vis-à-vis d'un même milieu. Le rouge est moins réfrangible que l'orangé,

(1) On a cependant signalé quelques substances qui fournissent des spectres dans lesquels l'ordre des couleurs n'est plus celui indiqué ci-dessus. La vapeur d'iode, par exemple, a un indice de réfraction plus grand pour le rouge que pour le violet. Mais ces cas de *dispersion anormale* sont exceptionnels; ils n'infirment en rien les conclusions qui vont suivre et nous les laisserons entièrement de côté.

l'orangé moins réfrangible que le jaune et ainsi de suite, quel que soit d'ailleurs le milieu réfringent considéré.

On est ainsi conduit à regarder la lumière blanche du soleil comme *composée* et comme constituée par le mélange d'une infinité de lumières *simples* de couleurs et de réfrangibilités différentes. Dans le passage à travers un prisme, la lumière composée incidente est alors décomposée en lumières simples, dont la *dispersion* résulte naturellement des réfrangibilités différentes que nous avons été conduits à attribuer à ces lumières simples composantes.

Toute lumière qui, par son passage à travers un prisme, donnera de même lieu à un phénomène de dispersion sera de même composé des diverses couleurs simples que le prisme aura séparées.

493. **Recomposition ou synthèse de la lumière blanche.** — La constitution que nous venons d'attribuer à la lumière blanche est confirmée par ce fait que la superposition des lumières de différentes couleurs, séparées par le prisme, redonne de la lumière blanche, comme le montrent les expériences suivantes dues à Newton.

1° Si l'on reçoit un faisceau de lumière blanche, dispersée par un

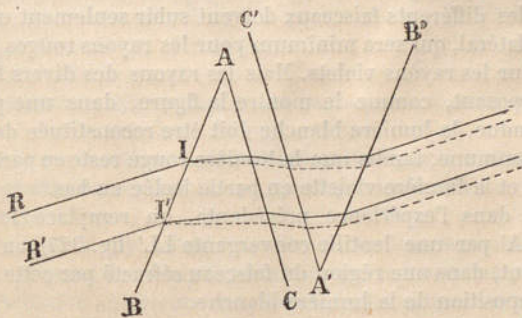


Fig. 326. — Synthèse de la lumière blanche par le prisme.

prisme A (fig. 326), sur un second prisme A' de même nature et de même angle, mais tourné en sens inverse du premier et disposé de telle sorte que ses faces soient parallèles à celles du premier, le faisceau transmis à travers le second prisme est constitué par de la lumière blanche et ne présente de phénomènes de coloration que sur ses bords.

L'explication de ce fait résulte immédiatement de la constitution attribuée à la lumière blanche.

En effet, un faisceau de lumière blanche, tel que celui qui est limité, sur la figure, par les rayons RI et RT, est décomposé par le premier prisme en ses divers éléments, c'est-à-dire en une série de faisceaux de réfrangibilité croissante, dont les faisceaux extrêmes, rouge et violet, ont seuls été représentés par des traits continus pour le premier et discontinus pour le second. Chacun de ces faisceaux est d'ailleurs constitué par des rayons parallèles, comme le faisceau incident; par suite, toutes les radiations de même réfrangibilité, rouges par exemple, rencontrent la face AC' du second prisme sous un même angle qui, en raison du parallélisme de AC' et de AC, est précisément égal à l'angle d'émergence des rayons rouges par rapport à la face AC. Les deux prismes A et A' étant identiques, les rayons rouges subissent dès lors, par leur passage à travers le prisme A', une déviation qui est précisément égale à celle que leur a imprimé le prisme A, mais de sens inverse; ces rayons émergent donc parallèlement à leur direction primitive, et il en sera de même pour les rayons des autres couleurs. Tout doit donc se passer comme à travers un milieu à faces parallèles et les différents faisceaux doivent subir seulement un déplacement latéral, qui sera minimum pour les rayons rouges et maximum pour les rayons violets. Mais les rayons des divers faisceaux se superposant, comme le montre la figure, dans une partie de leur étendue, la lumière blanche doit être reconstituée dans cette partie commune, tandis que la lumière rouge reste en partie isolée en haut et la lumière violette en partie isolée en bas.

2° Si, dans l'expérience précédente, on remplace le second prisme A' par une lentille convergente LL' (fig. 327), on observe également, dans une région du faisceau réfracté par cette lentille, la recombinaison de la lumière blanche.

Tous les rayons rouges vont, en effet, concourir en un point f_1 situé sur l'axe secondaire parallèle à la direction du faisceau rouge, les rayons violets en un point f_2 situé sur l'axe secondaire parallèle à la direction des rayons violets et les couleurs intermédiaires en des points intermédiaires à f_1 et f_2 ; aussi observe-t-on en $f_1 f_2$ un spectre très pur. A partir de f_1 et de f_2 , les faisceaux rouges et violets sont divergents et s'entrecroisent en ab ; comme d'ailleurs il en est de même pour les faisceaux de réfrangibilité intermédiaire, en chaque point de la section ab se trouvent superposées toutes les couleurs

du spectre, si bien qu'il se forme, sur un écran placé en ab , une tache parfaitement blanche. La figure montre, en outre, que si l'écran est en $a'b'$, la tache lumineuse, encore blanche au centre, est bordée de rouge à sa partie supérieure, et de violet à sa partie inférieure; c'est l'inverse qui se produit si l'écran est en $a''b''$.

3° On peut d'autre part démontrer que la superposition directe, en un même point de la rétine, des impressions produites par les diverses couleurs spectrales, donne une sensation identique à celle qui résulte de l'action de la lumière blanche.

On utilise, à cet effet, la *persistance des sensations lumineuses*;

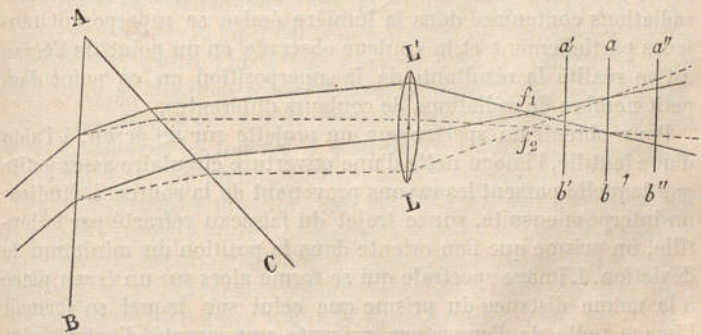


Fig. 327. — Synthèse de la lumière blanche à l'aide d'une lentille.

on désigne par ces mots ce fait d'observation que la sensation lumineuse persiste un certain temps après que la lumière a cessé d'arriver sur la rétine.

Il résulte de là que, si de nouvelles excitations viennent impressionner un point de notre rétine avant que la sensation persistante d'une excitation antérieure se soit éteinte, les actions successives, à des intervalles de temps très rapprochés, de ces diverses excitations, donneront naissance à une sensation résultante identique à celle que provoqueraient leurs actions simultanées. En particulier, lorsque les excitations successives, mais très rapprochées dans le temps, sont celles des diverses lumières spectrales, la sensation résultante devra être celle qui correspond à la lumière blanche, si cette lumière a bien la constitution indiquée.

C'est ce que l'on vérifie par l'expérience en peignant sur un disque (disque de Newton) des secteurs dont les couleurs se rapprochent

autant que possible de celles du spectre solaire, et en donnant à chacun de ces secteurs une étendue proportionnelle à l'intensité que possède, dans le spectre, la couleur qu'il représente.

En faisant alors tourner assez rapidement le disque, on réalise l'excitation successive, mais à des intervalles de temps très rapprochés, de la réfine par les diverses couleurs spectrales et l'on constate que toute la surface du disque paraît uniformément blanchâtre.

494. **Spectre pur.** — Les spectres obtenus dans les conditions que nous avons indiquées (§ 491) manquent toujours de pureté. Par suite, en effet, des dimensions de la source lumineuse, les diverses radiations contenues dans la lumière émise se superposent toujours partiellement et la couleur observée en un point de l'écran est en réalité la résultante de la superposition en ce point d'un petit nombre de radiations de couleurs différentes.

Pour obtenir un spectre pur, on projette sur un écran, à l'aide d'une lentille, l'image nette d'une ouverture circulaire assez petite par laquelle passent les rayons provenant de la source à étudier; on interpose ensuite, sur le trajet du faisceau réfracté par la lentille, un prisme que l'on oriente dans la position du minimum de déviation. L'image spectrale qui se forme alors sur un écran, placé à la même distance du prisme que celui sur lequel se formait l'image nette de l'ouverture, présente une pureté d'autant plus grande que l'ouverture employée est plus petite; mais l'intensité lumineuse est en même temps d'autant moindre.

On remplace en général l'ouverture circulaire par une fente parallèle aux arêtes du prisme; chaque point de la fente donne alors un spectre qui vient se juxtaposer, dans le sens de la largeur, aux spectres parallèles fournis par les points voisins; l'image spectrale est ainsi plus large; elle est d'ailleurs d'autant plus pure que la fente est plus étroite.

On augmente encore la pureté de l'image spectrale par l'emploi de deux ou plusieurs prismes à arêtes parallèles dont tous les angles sont orientés dans le même sens. Le faisceau est ainsi dispersé successivement par les divers prismes, et l'image obtenue est plus étalée et plus pure que celle que fournirait le premier prisme seul.

495. **Raies de Fraunhofer.** — Si la réfrangibilité des diverses radiations simples, qui constituent la lumière blanche du soleil, croissait d'une façon continue, le spectre solaire serait continu lui-même, quel que soit le nombre des prismes employés à le produire;

ce spectre serait plus ou moins étalé suivant le nombre de ces prismes, perdant d'ailleurs en intensité lumineuse ce qu'il gagnerait en étendue et en pureté, mais ne présenterait jamais, du rouge extrême à l'extrême violet, la moindre solution de continuité.

Or cette continuité, que l'on observe dans le spectre fourni par quelques sources lumineuses, n'existe pas dans le spectre solaire. Lorsque ce spectre est suffisamment pur, on y distingue des raies obscures parallèles aux arêtes du prisme, raies observées pour la première fois par Wollaston, et étudiées par Fraunhofer, dont elles portent le nom ; leur nombre est d'autant plus considérable que le spectre est plus pur ; on en connaît aujourd'hui des milliers.

Ces raies de Fraunhofer ont, par rapport aux couleurs spectrales, une position indépendante de la nature des prismes employés à produire le spectre ; mais leur nombre et leurs positions varient avec la source lumineuse d'où émane la lumière. On est dès lors conduit à chercher l'origine de ces raies dans la constitution même de la lumière qui les fournit et à admettre qu'elles correspondent à des radiations qui manquent dans la lumière analysée.

Nous reviendrons plus loin sur la cause de l'apparition de ces raies dans le spectre solaire ; nous nous bornerons pour le moment à faire remarquer que, par suite de l'invariabilité de leurs positions relativement aux diverses couleurs spectrales, ces raies sont fort commodes pour désigner d'une façon précise les diverses régions du spectre. Fraunhofer avait déjà distingué, dans le spectre solaire, huit raies principales, plus nettes, plus larges ou plus obscures que les autres, qu'il avait désignées par les huit premières lettres majuscules de l'alphabet. Les raies A, B et C se trouvent dans le rouge (voir planche VI, fig. 1), D est entre l'orangé et le jaune, E entre le jaune et le vert, F au milieu du vert, G entre le bleu et l'indigo, H dans l'extrême violet. Ces raies peuvent du reste, par l'emploi d'un nombre suffisant de prismes, être décomposées en un certain nombre de raies plus fines, si bien que les raies simples A, B, C..., observées dans des spectres peu étalés, sont en réalité des groupes de raies distinctes. Entre ces raies ou groupes de raies, il en existe un très grand nombre d'autres qui peuvent également servir à définir rigoureusement les diverses régions du spectre et que l'on désigne par les lettres minuscules $a, b, c...$ ou par les lettres grecques $\alpha, \beta, \gamma...$

496. **Coefficient de dispersion.** — On appelle *coefficient de dispersion* d'une substance la différence $n_H - n_B$ des indices de cette sub-

stance pour les radiations qui correspondent à la raie H dans le violet et à la raie B dans le rouge.

L'utilité de la considération du coefficient de dispersion provient de ce que, pour deux substances données, le rapport des déviations d'une même radiation n'est pas constant. En d'autres termes, si les radiations, rouges par exemple, sont également déviées par deux prismes de substances différentes, deux autres radiations identiques sont, en général, inégalement déviées.

Il résulte encore de là que, dans les spectres fournis par des prismes de coefficient de dispersion différents, la distance de deux raies quelconques n'est point proportionnelle à celle des raies B et H. Sans doute les couleurs occupent le même ordre dans les divers spectres, mais l'étendue de chacune d'elles n'est nullement proportionnelle à l'étendue totale du spectre.

On nomme *coefficient de dispersion partielle* la différence des indices d'une même substance pour deux radiations quelconques autres que les radiations extrêmes.

497. **Achromatisme.** — Nous venons de voir que la loi suivant laquelle sont dispersées les diverses radiations simples, par leur passage à travers un prisme, varie dans toutes ses particularités avec la substance du prisme.

Il résulte de là, comme on va le voir, qu'il est possible d'achromatiser deux prismes, c'est-à-dire qu'il est possible d'annuler la dispersion que subit un faisceau de lumière composée en traversant un prisme, sans annuler du même coup la déviation comme nous l'avons fait plus haut (§ 493, 1^o).

Pour obtenir ce résultat, il faut rendre parallèles entre elles les radiations de différentes couleurs et superposer leurs directions, sans cependant les rendre parallèles à leur direction primitive.

Or, il est facile de déterminer les conditions auxquelles doivent satisfaire deux prismes pour qu'il en soit ainsi, lorsque leurs angles de réfringence sont assez petits et que la lumière les traverse suivant une direction sensiblement perpendiculaire à leur plan bissecteur. Dans ce cas, en effet, la formule (3) du paragraphe 420 :

$$\delta = (i + i') - (r + r')$$

où l'on peut remplacer i par nr et i' par nr' , devient

$$\delta = (n - 1)(r + r') = (n - 1)A,$$

en appelant A l'angle de réfringence du prisme que l'on considère.

Soient dès lors deux prismes de substances différentes et dont nous supposons les angles de réfringence A et A' assez petits. La déviation δ_1 imprimée par le premier prisme à des radiations déterminées, qui tombent presque normalement sur ce prisme, sera

$$\delta_1 = (n_1 - 1)A,$$

n_1 étant l'indice du prisme par rapport à ces radiations.

Disposons à la suite du prisme A le second prisme A' , de manière que ses arêtes soient parallèles à celles du premier et représentons par n'_1 l'indice de ce prisme par rapport aux radiations considérées; la déviation que A' imprimera à ces radiations sera :

$$\delta'_1 = (n'_1 - 1)A'.$$

La déviation totale Δ_1 que subissent les radiations considérées, par leur passage à travers les deux prismes, sera la somme algébrique des deux déviations précédentes :

$$\Delta_1 = \delta_1 + \delta'_1 = (n_1 - 1)A + (n'_1 - 1)A'.$$

Si nous considérons une autre espèce de radiations simples, nous aurons de même, en désignant par n_2 et n'_2 les indices des deux prismes relativement à ces radiations et par Δ_2 la déviation totale :

$$\Delta_2 = (n_2 - 1)A + (n'_2 - 1)A'.$$

Pour que ces deux espèces de radiations soient parallèles, il faudra que $\Delta_2 = \Delta_1$, ce qui donne :

$$\begin{aligned} (n_2 - 1)A + (n'_2 - 1)A' &= (n_1 - 1)A + (n'_1 - 1)A' \\ \text{d'où :} \quad (n_2 - n_1)A + (n'_2 - n'_1)A' &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Les couleurs, c'est-à-dire les diverses espèces de radiations simples, étant toujours disposées dans le même ordre, quel que soit le prisme qui produit la dispersion, les différences entre parenthèse sont toutes deux positives, ou toutes deux négatives; il faut donc en premier lieu, pour que la condition (1) soit satisfaite, que A et A' soient de signes contraires, c'est-à-dire que les deux prismes aient leurs angles réfringents tournés en sens inverse. De plus, les va-

leurs absolues de ces angles A et A' doivent satisfaire à la condition :

$$\frac{A}{A'} = \frac{n_2 - n_1}{n_2 - n_1},$$

que l'on tire de l'équation (1) en changeant le signe du second terme. Les angles A et A' doivent donc être en raison inverse des coefficients de dispersion des deux substances relativement aux deux radiations considérées.

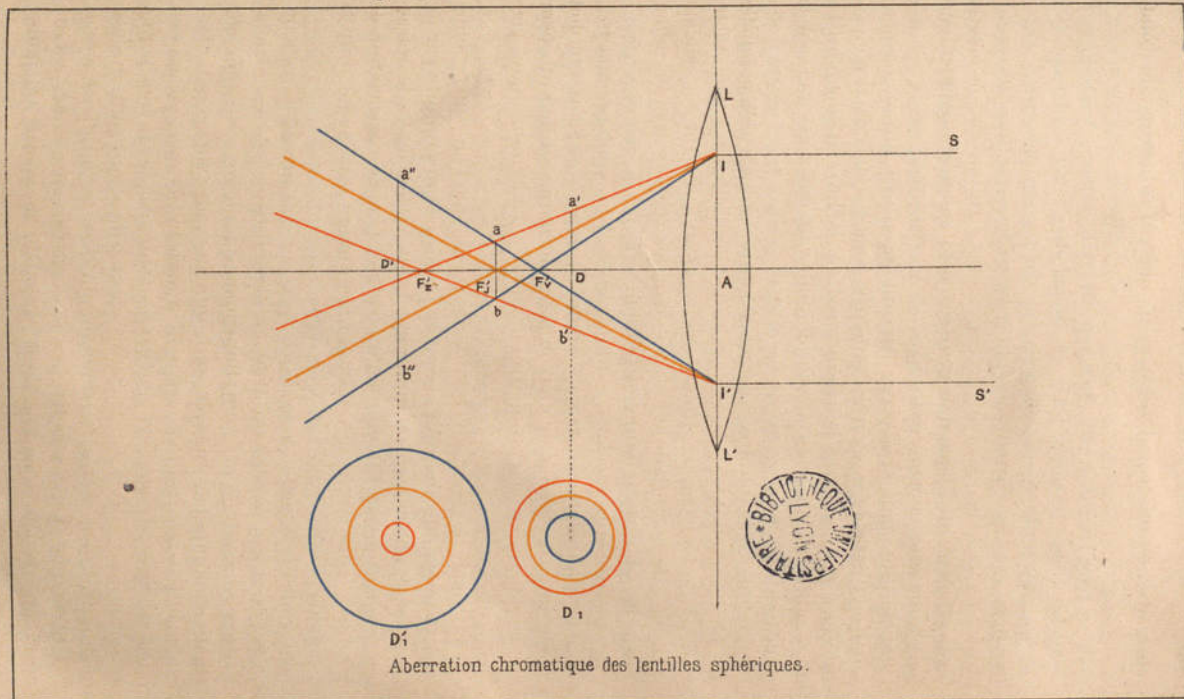
Lorsque les deux prismes satisferont à cette condition, les deux radiations considérées seront rendues parallèles, mais il n'en résulte pas que les autres le soient aussi, et l'achromatisme n'existe, en réalité, que pour les deux radiations qui ont servi à établir la condition précédente.

Toutefois les radiations voisines sont alors à peu près parallèles aux deux radiations pour lesquelles le parallélisme a été établi; aussi obtient-on un achromatisme général suffisant en rendant parallèles deux radiations situées dans les régions les plus lumineuses du spectre, le jaune et le bleu.

Des instruments spéciaux, connus sous le nom de *diasporamètres*, permettent de déterminer expérimentalement le rapport qui doit exister entre les angles de deux prismes de nature différente pour que ces prismes s'achromatisent aussi parfaitement que possible.

498. Prisme à vision directe. — De même que l'on peut, comme nous venons de le montrer, annuler la dispersion produite par un prisme sans annuler en même temps la déviation due à la réfraction prismatique, il est de même possible, par une association de prismes, d'annuler la déviation sans annuler du même coup la dispersion.

On conçoit, en effet, d'après ce que nous avons dit plus haut (§ 496), qu'il soit possible de trouver deux prismes, de coefficients de dispersion différents, qui impriment la même déviation aux radiations jaunes par exemple, sans imprimer aux autres radiations des déviations égales. Dès lors, si l'on associe ces deux prismes en tournant leurs angles réfringents en sens inverse, les rayons jaunes ne seront pas déviés, et les autres radiations, qui sont chacune inégalement déviées par les deux prismes, resteront dispersées de part et d'autre de ces radiations jaunes. On aura donc, sur un écran, une image spectrale dont la partie moyenne, la jaune,



Aberration chromatique des lentilles sphériques.

n'aura subi aucune déviation. Ce système de prismes porte le nom de *prisme à vision directe*.

Les prismes à vision directe, qui sont dus à Amici, sont en général constitués par l'association de cinq prismes (deux prismes de flint intercalés entre trois prismes de crown) dont les angles réfringents sont alternativement tournés dans un sens et dans l'autre.

499. — **Dispersion, ou aberration de réfrangibilité dans les lentilles.** — Si les phénomènes de dispersion sont surtout marqués avec les prismes, ils se produisent cependant dans tout phénomène de réfraction, et en particulier dans la réfraction à travers les lentilles. Soit, en effet, un faisceau parallèle de lumière blanche tombant sur une lentille mince (planche V). Les rayons rouges de ce faisceau iront former leur foyer en un point F'_r dont la distance au centre optique sera donnée par la formule (§ 433) :

$$\frac{1}{f'_r} = (n_r - 1) \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R'} \right)$$

en désignant par n_r l'indice pour les rayons rouges de la substance qui constitue la lentille.

Les rayons violets iront de même former leur foyer en F'_v , à une distance f'_v donnée par la formule :

$$\frac{1}{f'_v} = (n_v - 1) \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R'} \right)$$

Or n_v étant plus grand que n_r , f'_v sera plus petit que f'_r ; le foyer de rayons violets sera donc plus rapproché du centre optique O que celui des rayons rouges. Les couleurs intermédiaires formeront d'ailleurs leurs foyers entre F'_v et F'_r .

On voit que chaque groupe de rayons d'une même réfrangibilité, c'est-à-dire d'une même couleur, sera, après réfraction, compris dans les deux nappes d'un cône ayant pour base le contour de la lentille et pour sommet un point situé entre F'_r et F'_v . Dans la partie centrale, commune à tous ces cônes, les diverses radiations simples restent superposées et la lumière blanche complexe persiste; mais il n'en est pas de même sur les bords du faisceau réfracté où les couleurs sont en partie dispersées.

La planche V montre immédiatement que, sur un écran, on aura une tache blanche bordée de rouge si l'écran est en $a'b'$ et une tache blanche bordée de violet si l'écran est en $a''b''$; en ab , il y

aura sans doute superposition complète des radiations extrêmes rouges et violettes, mais non des couleurs intermédiaires, comme le montre la planche pour le jaune ; on aura donc encore une tache irisée sur les bords.

On a donné à ces phénomènes de dispersion produits par les lentilles le nom d'*aberrations de réfrangibilité*. Ces aberrations sont d'autant plus grandes que l'on considère des rayons plus marginaux.

500. **Achromatisme des lentilles.** — Les aberrations de réfrangibilité nuisent évidemment à la netteté des images fournies par les lentilles ; aussi est-il essentiel de corriger ces aberrations lorsqu'elles existent à un degré appréciable.

De même que pour les prismes, on obtient des lentilles achromatiques en associant à une lentille convergente une lentille divergente, de substance différente, dont le coefficient de dispersion n'est pas égal à celui de la première. Une lentille convergente en crown et une lentille divergente en flint constituent un système convergent achromatique ; ce système a évidemment un pouvoir dioptrique moindre que celui de la lentille de crown, mais il est du moins achromatique et fournit des images très nettes, dépourvues d'irisation, que l'on peut d'ailleurs amplifier par l'emploi de nouvelles lentilles achromatiques.

En réalité, avec deux lentilles, comme avec deux prismes, on ne peut détruire rigoureusement la dispersion que pour deux radiations spectrales ; mais en choisissant ces radiations dans les parties voisines des régions les plus lumineuses du spectre, on obtient, dans la pratique, un achromatisme général suffisamment parfait.

On peut également obtenir des images dépourvues d'irisation, non plus par l'association d'une lentille convergente et d'une lentille divergente formées de substances différentes, mais par l'emploi de lentilles de même substance, convenablement choisies et convenablement placées.

Soient par exemple une lentille convergente ll' (fig. 328) et un objet bb' éclairé par la lumière solaire, et placé au delà des premiers foyers principaux f_r et f_v de ll' pour les rayons rouges et violets. La construction montre que la lentille ll' donnera en vv' une image violette, et en rr' une image rouge de bb' , les images de couleurs intermédiaires se formant entre vv' et rr' . Un œil placé en C verra ces diverses images superposées ; mais, comme l'angle visuel qui correspond à l'image rouge est le plus grand

et celui qui correspond à l'image violette le plus petit, l'image sera vue blanche dans sa partie centrale seulement et irisée dans sa partie périphérique, dont le bord extrême sera rouge. Soit maintenant une seconde lentille convergente LL' , placée entre la lentille ll' et les points où viennent se former les images $v v'$, $r r'$; on comprend que, si cette lentille a un pouvoir dioptrique et une position convenables, elle puisse donner, comme le montre la construction,

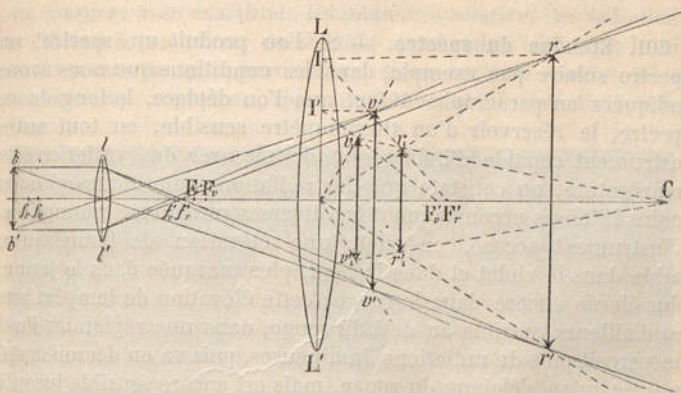


Fig. 328. — Lentilles convergentes disposées pour donner des images achromatiques.

une image rouge $r_1 r_1'$, et une image violette $v_1 v_1'$ qui soient vues du point C sous le même angle visuel ; il en sera d'ailleurs sensiblement de même pour les images intermédiaires et l'image résultante perçue sera dès lors presque complètement dépourvue d'irisation. On voit que la lentille LL' est disposée, par rapport à la lentille ll' qui joue le rôle d'objectif, comme la lentille de champ dans le microscope ; ce qui précède explique donc comment on peut, à l'aide de la lentille de champ, corriger, dans le microscope, les aberrations de réfrangibilité de l'objectif.

II. — ÉTUDE DES RADIATIONS

GÉNÉRALITÉS SUR LES RADIATION

501. **Étendue du spectre.** — Si l'on produit un spectre, un spectre solaire par exemple, dans les conditions que nous avons indiquées au paragraphe 494 et que l'on déplace, le long de ce spectre, le réservoir d'un thermomètre sensible, ou tout autre instrument capable d'indiquer et de mesurer des variations de température, on constate que des radiations calorifiques plus ou moins intenses accompagnent les diverses radiations lumineuses. L'instrument accuse, en effet, une élévation de température faible dans le violet et dans le bleu, plus marquée dans le jaune, plus élevée encore dans le rouge; cette élévation de température est d'ailleurs maxima au delà du rouge, dans une région où l'œil ne perçoit plus de radiations lumineuses, puis va en décroissant à mesure qu'on s'éloigne du rouge, mais est encore sensible jusqu'à une grande distance des radiations lumineuses les moins réfrangibles.

Si, d'autre part, on reçoit un spectre solaire sur certaines substances, le chlorure d'argent par exemple, on observe une décomposition chimique. Cette décomposition se manifeste dans toute la partie visible du spectre, présente un premier maximum au niveau du jaune, décroît dans le violet pour croître de nouveau au delà, présente un second maximum dans une partie invisible du spectre, décroît ensuite lentement et se manifeste jusqu'à une assez grande distance de l'extrême violet.

Le spectre solaire total se compose donc de trois parties : 1° un spectre *infra-rouge* constitué par des radiations moins réfrangibles que les radiations rouges et dont l'existence est démontrée par des effets *calorifiques*; 2° un spectre *visible*; 3° un spectre *ultra-violet* constitué par des radiations plus réfrangibles que les radiations violettes et dont l'existence est mise hors de doute par des effets *chimiques*.

Le spectre infra-rouge s'étend sensiblement depuis la raie 0,

jusqu'à la raie A (fig. 329), le spectre lumineux de A à H, le spectre ultra-violet de H à P (on a mis par erreur T sur la figure).

Les courbes tracées au bas de la figure 329 représentent, par leurs ordonnées, les intensités des effets calorifiques, lumineux et chimiques correspondant à chaque région du spectre.

La forme de la première courbe, qui se rapporte aux effets calorifiques, a pu être déterminée exactement ; mais il n'en est pas de même de la courbe des intensités lumineuses, car on n'a pu encore mesurer avec exactitude les intensités relatives des radiations de différentes couleurs ; aussi cette courbe des intensités lumineuses n'est-elle qu'approximative. Cette seconde courbe, jointe à la troisième, représente approximativement les variations d'in-

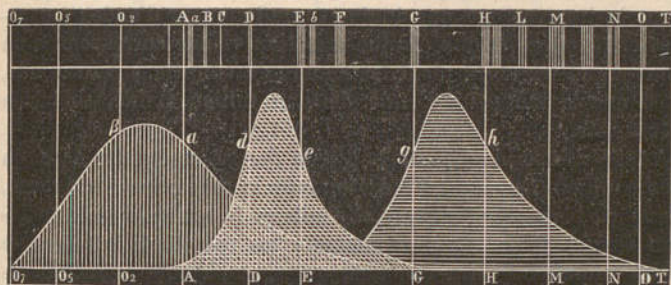


Fig. 329. — Courbes représentant les intensités calorifiques lumineuses et chimiques dans les diverses régions du spectre solaire.

tensité des actions chimiques dans toute l'étendue du spectre. Il importe toutefois de remarquer que la forme de la courbe des actions chimiques varie suivant la nature du composé sur lequel on fait agir les radiations spectrales.

502. **Nature des radiations.** — L'existence simultanée, en un même point de la région moyenne du spectre, d'effets calorifiques lumineux et chimiques conduit naturellement, soit à supposer qu'il existe simultanément en une même région trois radiations de natures différentes, soit à admettre qu'une même radiation possède simultanément trois propriétés différentes correspondant aux trois catégories d'effets calorifiques, lumineux et chimiques qui peuvent être produits. Cette seconde hypothèse est confirmée par diverses expériences sur lesquelles nous aurons à revenir plus loin. On a constaté, en effet, que, quelles que soient les modifica-

tions que l'on fasse subir, dans sa marche ou dans son intensité, à une radiation déterminée de la région visible du spectre, on ne pouvait jamais séparer les uns des autres ses effets chimiques, lumineux et calorifiques; de plus tout affaiblissement apporté à l'une des propriétés calorifique, lumineuse ou chimique, de l'une de ces radiations s'accompagne d'un affaiblissement proportionnel des deux autres propriétés de cette même radiation.

D'autre part, nous verrons dans la suite que la lumière est un mouvement vibratoire d'une nature spéciale, dont la propagation s'opère par l'intermédiaire d'un fluide particulier, l'éther, qui existe aussi bien dans les espaces interplanétaires que dans les vides laissés entre elles par les molécules matérielles des corps. Nous verrons en outre que les mouvements vibratoires qui constituent la lumière ont une durée et une longueur d'onde⁽¹⁾ extrêmement courtes et que chaque radiation visible correspond à un mouvement vibratoire dont le nombre de vibrations par seconde, ainsi que la longueur d'onde dans un milieu donné, sont bien déterminés.

A telle vitesse de vibration, à telle longueur d'onde dans un même milieu, correspond donc toujours la même radiation rouge, jaune ou bleue, quelle que soit d'ailleurs la source d'où la radiation émane. Il en est de même pour les radiations infra-rouges et les radiations ultra-violettes, qui sont chacune caractérisées par la durée de la vibration ou par la longueur d'onde du mouvement vibratoire qui leur correspond. Les radiations uniquement calorifiques correspondent à des vibrations relativement lentes dont le nombre, qui augmente avec la réfrangibilité, ne dépasse pas 400 trillions par seconde; le nombre de vibrations des radiations uniquement chimiques est par contre supérieur à 700 trillions par seconde et augmente de même à mesure que la radiation considérée est plus réfrangible. Les radiations lumineuses ou visibles correspondent par conséquent à des nombres de vibrations qui varient de 400 trillions (radiations rouges) à 700 trillions (radiations violettes) par seconde.

Il n'y a donc pas lieu, d'après ce qui précède, de considérer trois espèces de radiations calorifiques, lumineuses, chimiques, mais un seul mouvement vibratoire capable de produire, suivant les corps

(1) Le sens de cette expression a déjà été donné en Acoustique (§ 335); c'est la distance à laquelle se propage le mouvement vibratoire pendant la durée d'une vibration.

sur lesquels il agit, thermomètre, œil humain, composé chimique, des effets calorifiques, lumineux ou chimiques. L'expérience montre en outre que les vibrations les plus lentes doivent être regardées comme pouvant surtout donner naissance à des phénomènes calorifiques; les vibrations de rapidité moyenne sont au contraire plus spécialement aptes à exciter la membrane nerveuse oculaire ou rétine; enfin les vibrations les plus rapides sont plus particulièrement propres à provoquer des réactions chimiques. Ces manifestations diverses ne sont pas d'ailleurs l'apanage exclusif de tel ou tel groupe de radiations et une même radiation de la région moyenne du spectre total est apte à produire des effets calorifiques lumineux ou chimiques, suivant le corps sur lequel on la fait agir.

Ajoutons que l'étendue du spectre calorifique augmente à mesure que les procédés employés pour constater une différence de température deviennent plus parfaits. Le spectre visible, d'autre part, n'a pas la même étendue pour les divers yeux et s'étend notablement, en particulier du côté de la région la plus réfrangible, pour les yeux privés de cristallin (yeux opérés de la cataracte). Enfin l'étendue du spectre chimique varie également avec la constitution du corps sur lequel les radiations agissent.

503. **Émission des radiations.** — D'après ce que nous venons de dire sur la nature des radiations, on est conduit à concevoir l'émission de ces radiations de la manière suivante.

La chaleur, comme tous les agents physiques, étant un mode de mouvement, les molécules matérielles de tout corps, considéré à une température supérieure au 0 absolu, sont animées de mouvements dont la nature est d'ailleurs inconnue encore. On conçoit que ces mouvements des molécules matérielles se communiquent aux molécules d'éther environnantes, puis se propagent, par radiation, aux molécules d'éther extérieures au corps considéré.

Lorsqu'on élève la température d'un corps, on augmente par cela même la force vive du mouvement de ses molécules ainsi que des molécules d'éther environnantes; l'intensité des radiations émises à l'extérieur doit donc augmenter, et c'est là une conséquence dont on peut constater l'exactitude au moyen d'un thermomètre ou d'une pile thermo-électrique placée à une distance invariable du corps.

Mais, en même temps, un autre phénomène apparaît. En effet, si l'on reçoit sur un prisme les radiations émises par le corps chauffé et si l'on explore, au moyen d'une pile thermo-électrique,

le spectre invisible obtenu, on constate, non seulement que chaque radiation augmente d'intensité à mesure que la température s'élève, mais encore que le corps émet de nouvelles radiations qui sont plus réfringibles et correspondent par suite à un mouvement vibratoire plus rapide de ses molécules et de celles de l'éther. Lorsque la température s'accroît suffisamment, l'augmentation de la rapidité des vibrations arrive à être suffisante pour que les radiations alors émises par le corps, soient capables d'impressionner la rétine; le corps, à partir de ce moment, est devenu lumineux. Si la température continue à augmenter encore, le corps, qui n'émettait d'abord que des radiations rouges, émet également des radiations de plus en plus réfringibles et sa couleur se modifie à mesure. Enfin pour une élévation de température suffisante, la rapidité des vibrations devient telle que le corps émet, en même temps que des radiations calorifiques et lumineuses, des radiations chimiques ultra-violettes.

Tous les corps doivent, d'après cette conception du phénomène de l'émission, être capables d'émettre des radiations de plus en plus réfringibles, pourvu que l'on communique à leurs molécules une force vive suffisante en élevant suffisamment leur température. L'expérience confirme pleinement cette manière de voir.

504. **Plan de l'étude des radiations.** — D'après la définition que nous avons donnée de l'Optique, cette partie de la Physique ne devrait comprendre que l'étude des manifestations lumineuses des radiations. Mais, par suite de l'identité de nature des diverses radiations, de l'identité des lois qui régissent leur propagation, leur émission, leur absorption, etc., et par suite aussi des transformations possibles de certaines de ces radiations les unes dans les autres, il est difficile de séparer complètement l'étude des radiations lumineuses de celle des radiations calorifiques et chimiques. D'autre part, à cause des modes spéciaux, chaleur, lumière, actions chimiques, suivant lesquels ils se manifestent, les divers groupes de radiations donnent lieu à des effets différents que l'on peut rapprocher, mais non confondre. En outre par suite de la diversité de nos moyens d'exploration (corps thermométrique, œil, substance sensible) en rapport avec les effets à observer, certains de ces effets ont pu être mieux étudiés pour certaines radiations que pour d'autres, si bien que l'étude des unes vient compléter celle des autres.

Nous étudierons donc parallèlement les radiations calorifiques,

lumineuses et chimiques au point de vue de leur propagation, de leur émission, de leur absorption, etc., et nous réunirons ensuite dans un même Chapitre tout ce qui est relatif aux effets divers de ces diverses radiations et à leurs transformations réciproques. Mais nous ne nous occuperons point encore, dans l'exposé qui va suivre, de la nature même du mouvement vibratoire qui constitue les diverses radiations ; l'étude de ce mouvement fera l'objet de l'*Optique physique*.

CHAPITRE PREMIER

RADIATIONS LUMINEUSES

I. — Propagation des radiations lumineuses.

505. **Lois de la propagation des radiations lumineuses.** — Ces lois ont été exposées en détail dans la partie de ce livre consacrée à l'Optique géométrique et nous n'avons pas à y revenir ; grâce à leur connaissance nous avons pu tirer des phénomènes de dispersion diverses conclusions relatives aux radiations, conclusions qui vont nous permettre de faire de ces radiations une étude plus complète.

II. Intensité et composition des radiations lumineuses émises par les différentes sources.

A. — INTENSITÉ.

506. **Pouvoir émissif. Pouvoir éclairant total. Éclairement.** — Les lumières émises par les différentes sources diffèrent généralement par leur intensité et par leur composition, c'est-à-dire par le nombre et par la proportion relative des diverses radiations simples qui les constituent. Nous nous occuperons d'abord des différences d'intensité.

On appelle *pouvoir émissif* ou *intensité* d'une source lumineuse la quantité de lumière émise, pendant l'unité de temps, par l'unité de surface de la source. La plupart des sources lumineuses étant constituées par un ensemble de points qui émettent des quantités différentes de lumière, la valeur du pouvoir émissif dépend de la région pour laquelle on le mesure et la connaissance de ce pouvoir relativement à une région déterminée ne renseigne en

général que fort imparfaitement sur l'avantage qu'il peut y avoir, au point de vue de la quantité totale de lumière fournie, à faire usage de telle ou telle source.

Ce qu'il importe surtout de mesurer dans la pratique, c'est la quantité totale de lumière émise par la source et aussi, dans certains cas, la quantité de lumière reçue par une surface déterminée. Ce sont là les raisons qui ont conduit à considérer, d'une part, le *pouvoir éclairant total* de la source et, d'autre part, l'*intensité d'éclairage* ou l'*éclairage* d'une surface déterminée.

On appelle *pouvoir éclairant total* d'une source la quantité de lumière que cette source émet, pendant l'unité de temps, dans toutes les directions; ce pouvoir éclairant dépend de l'*éclat* ou du *pouvoir émissif* des divers points de la source et du nombre des points éclairants qui la constituent, c'est-à-dire de sa surface.

On appelle d'autre part *intensité d'éclairage* ou *éclairage* d'une surface de position déterminée, la quantité de lumière reçue pendant l'unité de temps par un centimètre carré de cette surface.

Le pouvoir éclairant d'une source se déduit d'ailleurs de l'intensité d'éclairage que cette source produit sur une surface placée dans des conditions bien définies.

507. Lois de la variation de l'intensité de l'éclairage avec la distance de la surface à la source et l'orientation de cette surface. — Soit un point lumineux qui envoie de la lumière dans toutes les directions. Si l'on considère une sphère de rayon r ayant pour centre ce point lumineux S , la quantité totale Q de lumière émise par S sera toute entière reçue par la sphère qui sera en outre uniformément éclairée.

La quantité de lumière reçue par l'unité de surface de la sphère sera par suite égale à $\frac{Q}{4\pi r^2}$ et l'on voit que la quantité de lumière reçue par une surface toujours égale à l'unité, ou l'*intensité de l'éclairage*, varie en raison inverse du carré r^2 . Si l'on remarque en outre que la surface de la sphère est, en tous ses points, normale aux rayons lumineux qui lui arrivent, on peut énoncer la loi suivante connue sous le nom de *loi du carré des distances* :

La quantité de lumière envoyée par une source lumineuse, réduite à un point, sur une surface normale à la direction des rayons lumineux est en raison inverse du carré de la distance de la surface considérée à la source.

Le raisonnement qui précède et la loi que nous en avons déduite s'appliquent évidemment au cas d'une source de dimensions finies, pourvu que ces dimensions soient négligeables par rapport aux distances considérées.

Une surface plane, oblique par rapport au faisceau de rayons lumineux qui tombe sur elle, reçoit évidemment moins de lumière qu'une surface égale, normale à ces mêmes rayons ; on démontre facilement que :

L'intensité d'éclairage d'une surface oblique par rapport aux rayons incidents est proportionnelle au cosinus de l'angle que la normale à la surface fait avec la direction de ces rayons.

Cette loi, qui a été énoncée pour la première fois par Lambert, est connue sous le nom de *loi du cosinus*.

508. Mesure de l'intensité de l'éclairage à l'unité de distance et sous l'incidence normale. Photomètres. — Le pouvoir éclairant total d'une source ne peut être mesuré directement ; mais on peut l'évaluer, comme nous le verrons plus loin, d'après la quantité de lumière que la source envoie dans les diverses directions.

Lorsque la source envoie des quantités de lumière égales, ou sensiblement égales, dans toutes les directions, son pouvoir éclairant total I est évidemment proportionnel, toutes choses égales d'ailleurs, à la quantité q de lumière reçue par l'unité de surface placée à l'unité de distance, normalement aux rayons émis ; on peut donc alors prendre q pour mesure de I .

Dans la pratique, on mesure q en comparant cette quantité de lumière à celle que fournit, dans les mêmes conditions, une source constante dont le pouvoir émissif ou l'intensité sont pris pour unité. *L'intensité relative* des différentes sources est alors exprimée en fonction de cette unité.

L'unité d'intensité provisoirement adoptée est celle, proposée par Violle, d'une surface de 1cm^2 de platine à la température de solidification du métal.

L'inconvénient de cette unité est d'être difficilement réalisable ; aussi lui préfère-t-on généralement en France une unité d'une constance moins parfaite, une *lampe carcel* dont la mèche a des dimensions bien déterminées et qui est réglée de façon à brûler, par heure, 42 grammes d'huile de colza épurée. Le *carcel* vaut 0.481 de l'étalon Violle. On fait également usage d'une bougie spéciale, adoptée par le Congrès international des électriciens de 1889 comme étalon secondaire. Cette bougie, qui doit brûler

8.^{sr}3 de matière par heure, porte le nom de *bougie décimale* et son intensité est $\frac{1}{20}$ de l'étalon Violle.

En Angleterre, on prend fréquemment pour unité le *candle*, bougie en blanc de baleine qui doit brûler 8.^{sr}2 de matière par heure. Le candle vaut 0.034 de l'étalon Violle; il diffère donc peu de la bougie décimale.

Photomètres. — On a donné le nom de *photomètres* aux instruments destinés à comparer entre elles les intensités des diverses sources artificielles de lumière.

La mesure de l'intensité I d'une source S par rapport à l'intensité I' d'une autre source S' est en général basée sur la loi de la variation de l'intensité de l'éclairage avec la distance; cette mesure résulte en effet, pour un certain nombre de photomètres, des considérations suivantes.

On réalise une disposition expérimentale telle que chacune des deux moitiés juxtaposées d'un même écran translucide soit éclairée séparément par une seule des sources; puis, comme notre œil est plus apte à saisir l'existence d'une différence d'éclairement entre deux plages voisines que le degré de cette différence, on règle les distances d et d' des deux sources à l'écran de telle sorte que les deux moitiés de celui-ci paraissent également éclairées.

Soient dès lors I et I' les intensités à comparer, c'est-à-dire les quantités de lumière envoyées par chaque source sur une surface égale à l'unité et placée à l'unité de distance de chaque source, normalement à la direction des rayons incidents. Les quantités de lumière envoyées par chacune des sources sur l'unité de surface de chaque moitié de l'écran, supposé normal aux rayons incidents, seront respectivement égales à $\frac{I}{d^2}$ et $\frac{I'}{d'^2}$, et puisque ces deux moitiés sont également éclairées, on devra avoir :

$$\frac{I}{d^2} = \frac{I'}{d'^2}, \quad \text{d'où :} \quad \frac{I}{I'} = \frac{d^2}{d'^2}.$$

Lorsque l'égalité d'éclairement est obtenue, le rapport des intensités des deux sources est donc égal au rapport des carrés de leurs distances à l'écran. La mesure de ces distances permettra par suite de déterminer l'intensité relative de l'une des sources, si l'autre est la source étalon ou une source d'intensité connue.

Dans le *photomètre de Foucault* (fig. 330), l'éclairage de chacune

des moitiés de l'écran O par une seule des sources est obtenu grâce à une cloison opaque OI disposée perpendiculairement à l'écran, dont elle peut s'approcher ou s'éloigner à volonté, et placée entre les deux sources S et S' . Pour que la comparaison par l'œil de

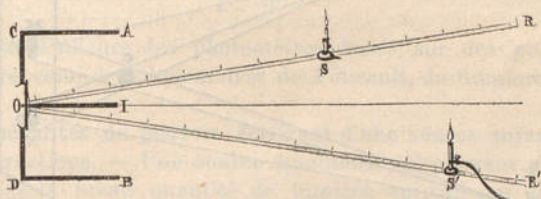


Fig. 330. — Photomètre de Foucault (Coupe).

l'éclaircissement des deux moitiés de l'écran soit plus facile, on doit régler la distance de la cloison à l'écran de façon que les deux plages à comparer soient aussi exactement juxtaposées que possible et qu'il n'y ait pas entre elles de région intermédiaire recevant plus ou moins de lumière que les plages à comparer.

Dans le *photomètre de Rumford*, représenté en perspective et en

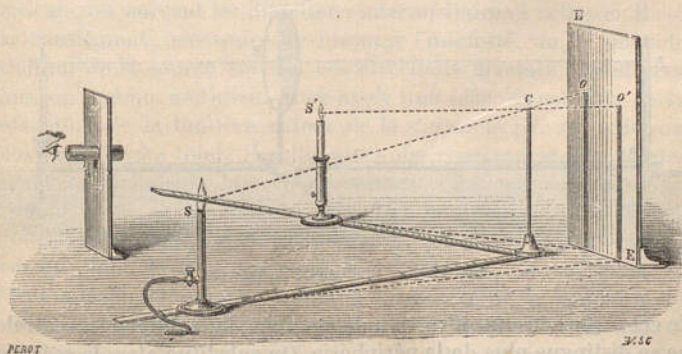


Fig. 331. — Photomètre de Rumford.

coupe sur les figures 331 et 332, il existe, en avant de l'écran, une tige opaque C dont chaque source S, S' projette une ombre o, o' ; à l'intérieur de chacune de ces ombres n'arrive, sur l'écran, que la lumière de l'une des sources, et c'est l'égalité d'intensité lumineuse

de ces deux parties moins éclairées que l'on doit réaliser pour pouvoir employer les formules précédentes.

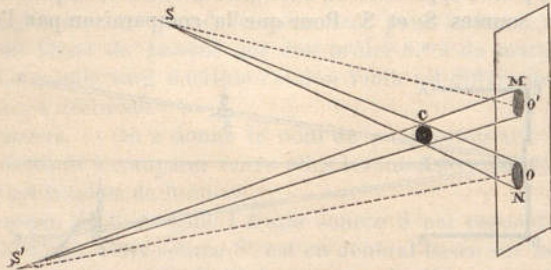


Fig. 332. — Photomètre de Rumford (Coupe).

Le photomètre de Bunsen (fig. 333) est constitué par un écran en papier blanc E au centre duquel existe une tache plus translucide obtenue par l'application d'un corps gras. Une source quelconque B étant disposée d'un côté de l'écran, on dispose, de l'autre côté, l'une des sources à comparer A et l'on règle sa distance à l'écran de telle sorte que, pour un observateur qui regarde l'un des côtés

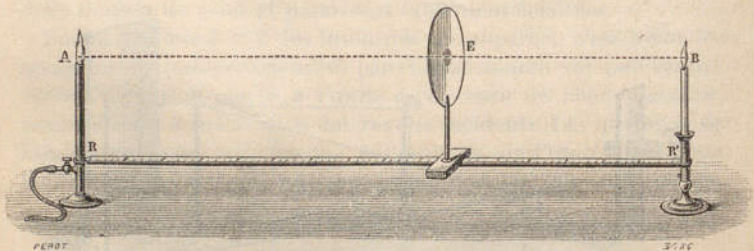


Fig. 333. — Photomètre de Bunsen.

de cet écran sous une direction déterminée, la tache grasse centrale ne se distingue plus de la périphérie. On substitue alors la seconde source à comparer A' à la source A et l'on règle encore la distance de A' à l'écran de telle sorte que la tache centrale disparaisse de nouveau pour l'œil observateur, dont la position doit rester invariable pendant les deux parties de l'expérience. Il est évident que les sources A et A', placées respectivement aux distances d et d' de l'écran, envoient sur celui-ci des quantités égales de lumière,

puisque l'effet observé, disparition de la tache grasseuse, est le même dans les deux cas ; si I et I' représentent les intensités des deux sources, on doit donc avoir :

$$\frac{1}{I'} = \frac{d^2}{d'^2}.$$

Il existe d'ailleurs des photomètres basés sur des principes autres que celui des photomètres de Foucault, de Rumford et de Bunsen.

509. Inégalités du pouvoir éclairant d'une source suivant diverses directions. — Une source lumineuse n'envoyant généralement pas la même quantité de lumière suivant les diverses directions, il faut, si l'on veut être renseigné sur le pouvoir éclairant total de la source, et si l'on veut comparer à ce point de vue les différentes sources lumineuses, effectuer dans diverses directions les déterminations que nous venons d'indiquer.

Si la forme de la source est celle d'une surface de révolution, la distribution de la lumière sera évidemment la même dans tous les méridiens ; mais, dans chacun d'eux, des différences notables d'éclairement pourront exister sur des surfaces égales prises à la même distance de la source suivant les directions horizontale ou verticale, ou suivant les directions intermédiaires à celles-ci. Il est par conséquent nécessaire de mesurer l'intensité ou le pouvoir éclairant de la source suivant ces directions diverses considérées dans un même méridien. Pour avoir une idée d'ensemble de la répartition de la lumière autour de la source et par suite de son pouvoir éclairant total, il suffit alors de représenter graphiquement les résultats de la manière suivante. Par un point pris sur un plan, point qui représente la source lumineuse, on mène des droites qui font avec une direction déterminée des angles égaux à ceux que font avec la verticale les directions, situées dans un même méridien, suivant lesquelles l'intensité de la source a été successivement mesurée ; puis on porte sur chacune de ces droites une longueur proportionnelle à l'intensité correspondante. La courbe obtenue en joignant les extrémités de toutes ces longueurs représentera graphiquement les variations de l'intensité de la source suivant les diverses directions considérées dans un même méridien.

Lorsque la source lumineuse n'est pas de révolution autour d'un axe, ce qui est le cas, par exemple, des becs de gaz dits papillons, la répartition de l'éclairement n'est pas la même dans les divers

méridiens. Pour avoir une idée complète du pouvoir éclairant total de la source, il est alors nécessaire d'effectuer dans divers méridiens la série des mesures d'intensité dont il a été parlé ci-dessus.

Dans le cas d'un bec de gaz dit papillon, ou d'une lampe à incandescence dont les diverses parties du filament de charbon sont situées dans un même plan, on peut se borner à effectuer ces mesures dans le plan de la flamme ou du filament, dans le plan perpendiculaire et dans le plan bissecteur des deux précédents.

510. **Mesure de l'éclairement d'une surface quelconque.** — Indépendamment de la mesure des intensités relatives des diverses sources lumineuses artificielles et du pouvoir éclairant d'une même source suivant diverses directions, il importe au médecin, pour des raisons d'hygiène oculaire, de savoir déterminer l'*intensité d'éclairage* ou l'*éclairement* d'une surface de position et d'orientation quelconques dans une salle de travail.

On ne peut guère songer à calculer cet éclairement, alors même que l'on connaîtrait les intensités des sources lumineuses (il y en a souvent plusieurs) qui éclairent la salle et l'orientation de la surface par rapport aux directions des rayons émanés de ces sources. La surface considérée reçoit, en effet, en outre des rayons venus directement des sources, la lumière que lui envoient par diffusion les plafonds et les murs; or on ne possède pas encore de données suffisantes pour pouvoir évaluer par le calcul cette quantité de lumière. Il est dès lors nécessaire de mesurer directement par l'expérience l'éclairement total de la surface, et un certain nombre d'instruments, dont l'étude est du ressort de la Physique biologique, ont été imaginés à cet effet.

B. — COMPOSITION DES RADIATIONS LUMINEUSES ÉMISES PAR DIFFÉRENTS CORPS.

511. **Du spectroscope.** — La différence de composition des lumières émises par différentes sources entraîne des différences de coloration; mais l'appréciation par l'œil de la couleur d'une source est absolument insuffisante pour faire connaître les radiations simples qui constituent la lumière émise par cette source; la composition de cette lumière ne peut être déterminée qu'en l'analysant au moyen d'un prisme, c'est-à-dire en produisant et en observant le *spectre d'émission* de la source.

Le mode de production du spectre que nous avons indiqué plus haut (§ 494) n'est d'ailleurs applicable que dans le cas où la source lumineuse est très intense ; encore ne permet-il pas même, dans ce cas, de mettre en évidence toutes les particularités du spectre. Il faut, pour étudier en détail les spectres d'émission des différentes sources, avoir recours à un instrument spécial, basé du reste sur le principe même de l'expérience que nous venons de rappeler et appelé *spectroscope*.

Le spectroscope, dont la figure 334 représente une section par un plan horizontal, a pour organe essentiel un prisme $a b c$,

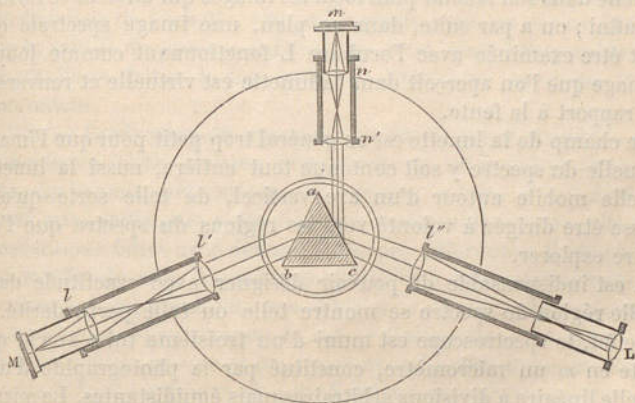


Fig. 334. — Spectroscope (Coupe).

généralement en flint, fixé au centre d'une plate-forme et disposé de telle sorte que ses arêtes soient verticales.

Sur les bords de la plate-forme se trouvent trois tubes affectés chacun à un usage spécial.

Le tube M'' , que l'on appelle *collimateur*, porte, à son extrémité la plus éloignée du prisme, une fente M , à bords mobiles et parallèles aux arêtes du prisme, dont la largeur peut être réglée à volonté au moyen d'une vis V (fig. 335). Cette fente se trouve dans le premier plan focal principal d'une lentille ou d'un système de lentilles L'' (fig. 334), fixé dans le même tube ; elle joue, lorsqu'on l'éclaire par la lumière de la source à analyser, le rôle d'objet lumineux, et les rayons qu'elle laisse passer sont, après réfraction par le système L'' , transformés en un faisceau de lumière parallèle qui

irait former à l'infini une image nette et renversée de la fente, si le prisme n'existait pas. Ce faisceau tombe sur la face *ab* du prisme qui le réfracte et le disperse.

Le collimateur et le prisme étant fixés, l'un par rapport à l'autre, dans les positions qui correspondent au minimum de déviation ⁽¹⁾, le prisme donnerait, à l'infini, autant d'images de la fente qu'il y a de radiations différentes dans la lumière considérée. Mais le faisceau réfracté et dispersé par le prisme, faisceau dans lequel toutes les radiations de même couleur sont parallèles, rencontre l'objectif *l''* d'une petite lunette astronomique *L''*, et cet objectif ramène dans son second plan focal les images qui allaient se former à l'infini; on a par suite, dans ce plan, une image spectrale qui peut être examinée avec l'oculaire *L* fonctionnant comme loupe. L'image que l'on aperçoit dans la lunette est virtuelle et renversée par rapport à la fente.

Le champ de la lunette est en général trop petit pour que l'image virtuelle du spectre y soit contenue tout entière, aussi la lunette est-elle mobile autour d'un axe vertical, de telle sorte qu'elle puisse être dirigée à volonté vers les régions du spectre que l'on désire explorer.

Il est indispensable de pouvoir désigner avec exactitude dans quelle région du spectre se montre telle ou telle particularité. A cet effet, le spectroscopie est muni d'un troisième tube *mn'n'* qui porte en *m* un micromètre, constitué par la photographie d'une échelle linéaire à divisions arbitraires mais équidistantes. Le micromètre *m*, que l'on doit éclairer avec une source lumineuse peu intense, peut du reste, grâce à un mécanisme variable suivant les instruments, s'approcher ou s'éloigner d'un système de lentilles *nn'* fixées dans le tube *mnn'*. Ce tube est orienté de façon que les rayons lumineux qui en sortent tombent sur la face d'émergence *ac* du prisme sous une incidence telle que ceux de ces rayons qui sont réfléchis par la face *ac* soient, après cette réflexion, dirigés suivant l'axe de la lunette et se superposent aux rayons réfractés par le prisme. Par suite, lorsque le micromètre est dans le premier plan focal principal du système de lentilles *nn'*, l'image que ces lentilles en donnent se forme à l'infini sur l'axe du tube et la réflexion sur la face *ac* substitue à cette image une seconde

(1) On place généralement le prisme des spectroscopes ordinaires dans la position du minimum de déviation pour les radiations jaunes, et l'on admet qu'il est sensiblement au minimum pour les autres radiations.

image également située à l'infini, mais sur l'axe de la lunette, c'est-à-dire en coïncidence avec le spectre fourni par le prisme de l'instrument.

En conséquence, un observateur pourra voir simultanément avec netteté le spectre et l'image du micromètre; il suffira pour cela de mettre d'abord au point l'image spectrale, en agissant sur l'oculaire L de la lunette, puis, sans plus toucher à cet oculaire, de mettre au point les divisions du micromètre, en donnant à celui-ci une position convenable par rapport au système de lentilles nn' .

Le tube qui porte le micromètre est en général mobile autour d'un axe vertical, ce qui permet de faire coïncider l'une quelconque des divisions de l'échelle, 100 par exemple, avec un repère fixe, tel que la raie D du spectre solaire. On rend ainsi comparables les observations faites à des époques différentes avec un même instrument.

512. — Graduation du spectroscopie en longueur d'onde. — La coïncidence d'une division déterminée du micromètre avec une raie également déterminée du spectre solaire n'est évidemment pas suffisante pour rendre comparables entre elles les observations faites avec des spectroscopes différents; il ne résulte pas en effet de cette coïncidence unique que toute particularité du spectre, qui se produit sur une division n du micromètre dans un spectroscopie, se produise sur la même division dans un autre spectroscopie dont le prisme et les divisions micrométriques ne seront pas identiques au prisme et aux divisions du premier instrument.

Mais on peut rendre les indications de tous les spectroscopes rigoureusement comparables entre elles, en établissant pour chaque instrument une graduation spéciale dont le principe est le suivant.

Nous avons dit que chaque radiation lumineuse simple était caractérisée par un mouvement vibratoire dont le nombre de vibrations par seconde, et par suite la longueur d'onde dans un milieu donné, étaient bien déterminés. Si nous considérons ces longueurs d'onde, que nous apprendrons à mesurer en Optique physique, comme connues, nous pourrions définir exactement la position de toute particularité aperçue dans un spectre par la longueur d'onde, dans l'air par exemple, de la radiation simple avec laquelle elle coïncide. Or cette désignation sera indépendante de l'instrument employé, puisque la longueur d'onde dans l'air de toute radiation simple est, pour chaque radiation, un caractère distinctif et indépen-

dant de la marche de cette radiation et des milieux dans lesquels elle s'est propagée, avant l'instant où on la considère comme partie constituante du spectre aérien que l'on observe.

Ceci posé, la graduation du spectroscopie en longueur d'onde se fait ainsi qu'il suit :

On éclaire la fente du spectroscopie par la lumière des nuées, que l'on réfléchit dans la direction de l'axe du collimateur à l'aide d'un miroir ou d'une feuille de papier blanc ; on aperçoit alors dans la lunette, si le spectroscopie est convenablement réglé, le spectre solaire avec ses raies de Fraunhofer. Ceci fait, on amène la division 100 du micromètre en coïncidence avec la raie D, et l'on note les divisions n , n' , n'' ... du micromètre qui coïncident avec les autres raies principales A, B, C, E, F, G, H ; puis l'on trace, sur une feuille de papier, une droite que l'on divise en parties égales, et, par chacune des divisions n , n' , n'' ... de la graduation ainsi obtenue, on élève des perpendiculaires respectivement égales aux longueurs d'onde 760, 688, 653, 589, 527, 486, 429, 396 des radiations qui correspondent aux raies A, B, C, D... du spectre solaire ; on relie enfin par un trait continu les extrémités des perpendiculaires dont il vient d'être question.

La longueur d'onde d'une radiation correspondant à une division quelconque du micromètre est alors donnée, avec une approximation suffisante, par la longueur de l'ordonnée élevée par cette division jusqu'à la rencontre de la courbe.

La position de toute particularité observée dans le spectre est ainsi caractérisée, non par la division N du micromètre, avec laquelle elle coïncide, mais par la longueur de la perpendiculaire qui correspond à la division N de la graduation établie sur le papier, c'est-à-dire par la longueur d'onde de la radiation qui coïncide avec la particularité observée.

513. — **Divers types de spectroscopes.** — Tous les spectroscopes ne sont pas identiques à celui que nous avons décrit. Dans certains modèles, par exemple, le prisme de l'instrument est constitué par un prisme à vision directe et le spectroscopie porte lui-même le nom de *spectroscopie à vision directe*. Cette substitution permet de placer la lunette dans la direction même du collimateur ; il est ainsi plus facile à l'observateur de viser la source qu'il veut analyser.

Il est nécessaire, pour certaines recherches, d'obtenir des spectres plus étalés que ceux que fournit la dispersion à travers un seul

prisme ; on a construit à cet effet des spectroscopes à plusieurs prismes. Le faisceau lumineux à analyser traverse alors successivement ces divers prismes, qui sont chacun orientés de manière à réaliser le minimum de déviation pour la lumière qui les traverse.

Grâce à un élégant dispositif, complètement différent de celui des prismes à vision directe, Thollon a pu construire des spectroscopes dans lesquels la lumière émergente traverse deux fois en sens inverse les prismes de l'instrument, est dispersée chaque fois dans le même sens et sort suivant une direction parallèle à la direction incidente. Le modèle à 8 prismes du spectroscopie de Thollon permet d'apercevoir 3000 raies dans le spectre solaire.

314. **Comparaison de deux spectres.** — La plupart des spectroscopes sont munis d'un petit prisme à réflexion totale que l'on peut appliquer sur la fente du collimateur, de façon à en recouvrir la moitié supérieure. Cette disposition permet d'observer simultanément deux spectres dont on veut comparer les détails. Les deux sources à comparer sont placées, l'une f' (fig. 335) en face de la fente dont elle éclaire la partie inférieure,

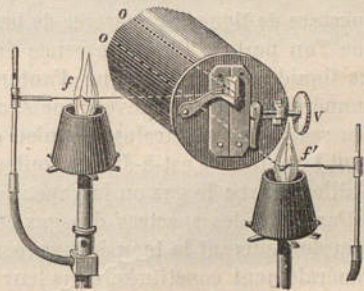


Fig. 335. — Comparaison de deux spectres.

l'autre f latéralement, de telle sorte que ses rayons, réfléchis par le prisme à réflexion totale, tombent, comme le montre la figure, sur la partie supérieure de la fente. On aperçoit alors dans la lunette les spectres superposés des deux sources, le spectre inférieur étant d'ailleurs celui de la source qui éclaire la partie supérieure de la fente et réciproquement, car les images vues à travers la lunette du spectroscopie sont renversées.

315. **Spectres d'émission des solides et des liquides incandescents.** — Au point de vue de l'ensemble des radiations qu'ils émettent lorsqu'ils sont portés à l'incandescence, les corps solides et liquides se distinguent nettement des corps gazeux et des vapeurs.

Les solides et les liquides, dont on élève progressivement la température, émettent d'abord seulement des radiations calorifiques, puis des radiations lumineuses rouges auxquelles s'ajoutent suc-

cessivement des radiations de plus en plus réfrangibles ; leur couleur, d'abord rouge sombre, passe par conséquent, de plus en plus au blanc à mesure que leur température s'accroît.

Les spectres des solides et des liquides incandescents sont ainsi plus ou moins complets, suivant la température à laquelle on porte ces corps, mais ces spectres sont toujours *continus* et ne présentent, aussi bien dans leur partie lumineuse que dans leurs parties invisibles, aucune raie obscure analogue aux raies de Fraunhofer. Lorsque la température est assez élevée, les spectres d'émission de tous les corps solides ou liquides présentent donc le même aspect, quel que soit le corps considéré ; ils ne peuvent dès lors servir à caractériser ces corps.

516. Spectres d'émission des gaz et des vapeurs incandescents. Spectres de lignes et spectres de bandes. — Les gaz et les vapeurs que l'on porte à l'incandescence émettent, comme les solides et les liquides, des radiations d'autant plus réfrangibles que leur température est plus élevée ; mais, au lieu de donner toute la série des radiations spectrales, ils n'en émettent qu'un petit nombre dont la nature, c'est-à-dire la couleur ou la longueur d'onde, varie d'ailleurs avec le gaz ou la vapeur considérée.

Par suite, les spectres des gaz ou des vapeurs, plus ou moins complets suivant la température, sont toujours *discontinus* ; ils sont généralement constitués, dans leur partie lumineuse, par un plus ou moins grand nombre de raies brillantes, à bords bien délimités, séparées par des espaces obscurs ; la couleur de chacune de ces raies est évidemment identique à celle que l'on apercevrait dans la région exactement correspondante d'un spectre continu.

De tels spectres portent le nom de *spectres de lignes*.

Les parties infra-rouge et ultra-violette des spectres des gaz et des vapeurs présentent les mêmes caractères de discontinuité que la partie lumineuse.

Le nombre et la couleur, et par suite la position, des raies brillantes d'un spectre de lignes varient avec la nature du gaz ou de la vapeur qui fournit ce spectre et peuvent servir à caractériser ces corps. C'est ainsi que le spectre des vapeurs de sodium (Planche VI, fig. 3) est caractérisé par une double raie brillante occupant la place de la double raie obscure D, etc., etc.

Les spectres de lignes des gaz et des vapeurs sont, à cause de leur netteté, fréquemment utilisés pour la graduation des spectroscopes en longueur d'onde. Les raies brillantes de ces spectres four-

RAIES DE FRAUENHOFER

ET SPECTRES D'ÉMISSION DE DIVERSES VAPEURS INCANDESCENTES

Fig 1. - Spectre solaire (partie lumineuse)

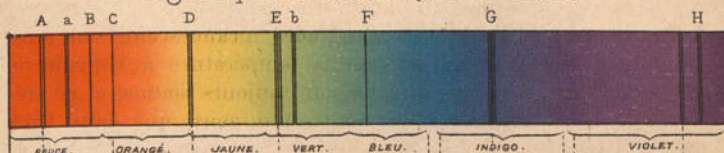


Fig 2. - Spectre du Potassium.



Fig 3. - Spectre du Sodium.



Fig 4. - Spectre du Thallium.



Fig 5. - Spectre du Césium.



Fig 6. - Spectre du Rubidium.



nissent alors des repères, que l'on peut substituer aux raies A, B, C, D...., du spectre solaire pour la construction de la courbe dont il a été question plus haut (§ 512).

Dans certaines conditions, les spectres de quelques gaz et de quelques vapeurs sont constitués, non plus par de fines raies brillantes, mais par des bandes estompées plus ou moins larges. Ces *spectres de bandes* s'observent généralement sous de faibles pressions et à des températures peu élevées. Wulner a pu, en faisant croître graduellement la pression, passer, pour l'azote, du spectre de bandes au spectre de lignes. Ces spectres de bandes sont trop variables pour permettre de caractériser les corps qui les fournissent.

Enfin on a pu, en portant certains gaz à l'incandescence sous des pressions graduellement croissantes, leur faire émettre des radiations de plus en plus nombreuses et leur faire donner même des spectres continus comme ceux des solides et des liquides.

517. **Analyse spectrale.** — Nous avons vu que les spectres de lignes étaient caractéristiques des corps qui leur donnaient naissance. Or, lorsqu'une source lumineuse renferme les vapeurs incandescentes de plusieurs corps, le spectre qu'elle fournit présente les raies caractéristiques de chacun de ces corps; de ce fait résulte une méthode d'analyse qualitative, imaginée par Kirchhoff et Bunsen, qui est incomparablement plus sensible et plus rapide que les méthodes chimiques les plus précises. Il suffit par exemple, pour que la raie caractéristique du sodium soit nettement aperçue au spectroscopie, qu'il arrive, dans la flamme analysée, un millionième de milligramme de sodium par seconde.

L'analyse spectrale n'a pas été seulement utile pour caractériser les différents corps par les raies qui leur sont propres; en montrant la présence, dans certains spectres, de raies qui ne correspondaient à aucun corps connu, elle a permis encore de conclure à l'existence de corps nouveaux que l'on a pu ensuite isoler par des procédés chimiques. C'est ainsi que Kirchhoff et Bunsen ont découvert, dans les eaux-mères des salines de Durkheim, un métal nouveau, le *cæsium*, caractérisé par deux lignes bleues (Planche VI, fig. 5), et dans la lépidolite un autre métal, le *rubidium*, dont le spectre présente deux lignes rouges et deux lignes violettes caractéristiques (Planche VI, fig. 6). C'est ainsi encore que Crookes a pu indiquer l'existence, dans certains résidus sélénifères, d'un troisième métal, le *thallium*, qui est caractérisé par une raie verte

(Planche VI, fig. 4) et que Lamy est parvenu à isoler dans les résidus des chambres de plomb. C'est également l'analyse spectrale qui a fait découvrir à Reich et Richter l'*indium* dans les blendes de Freiberg, à Lecoq de Boisbaudran le *gallium* dans la blende de Pierrefite, à Ramsay l'*hélium* dans un minerai d'urane, la clévite.

518. Manières de rendre les gaz et les vapeurs incandescents.

— a. — Pour porter un corps gazeux à l'incandescence, on adopte généralement la disposition de Plücker, qui consiste à introduire le gaz en expérience dans un tube de Geissler présentant en son milieu une partie capillaire. Le tube s'illumine lorsqu'on y fait passer le courant induit d'une bobine Ruhmkorff, et il suffit d'examiner au spectroscopie la portion capillaire, où l'illumination est la plus vive, pour observer le spectre du gaz.

Toutefois les apparences de ce spectre peuvent varier avec la pression du gaz et avec la tension électrique qui existe sur les deux électrodes fixées à chacune des extrémités du tube. De plus, au spectre du gaz viennent se superposer, à moins qu'on n'adopte des dispositions spéciales, des raies brillantes dues à la matière qui constitue les électrodes et qui est volatilisée par le passage de l'électricité. Ces diverses particularités rendent assez délicate l'étude du spectre de certains gaz.

b. — Pour les corps qui ne sont pas gazeux à la température ordinaire, pour les métaux par exemple, on peut se servir de l'un des procédés suivants qui permettent d'obtenir des spectres de lignes très nets.

On emploie comme source calorifique la flamme d'un bec Bunsen brûlant au bleu. Cette flamme, qui s'obtient en faisant arriver un courant d'air dans le courant de gaz d'éclairage qui l'alimente, n'a pas par elle-même de spectre sensible ; à peine y distingue-t-on parfois les bandes caractéristiques de l'oxyde de carbone, avec lesquelles il est facile de se familiariser ; mais il suffit d'y introduire une parcelle d'un sel métallique, porté par un fil de platine, pour observer au spectroscopie le spectre caractéristique de la vapeur du métal de ce sel. Les sels qui donnent le plus facilement les spectres de vapeurs métalliques sont les chlorures ; toutefois on observerait également avec d'autres sels le spectre du métal, grâce à la température élevée du bec Bunsen. A une température plus basse, on obtient le spectre du sel lui-même (Mitscherlich, Diacon).

Cette méthode, qui consiste dans l'emploi du bec Bunsen, a été

proposée par Kirchhoff et Bunsen ; c'est la meilleure que l'on puisse employer pour l'étude des spectres des métaux alcalins et alcalino-terreux.

c. — Pour volatiliser les autres métaux, on peut se servir de l'arc voltaïque. On creuse alors, à l'extrémité du charbon inférieur d'une lampe à arc, une petite cavité dans laquelle on place des fragments du métal que l'on veut réduire en vapeur et l'on établit le courant en ayant soin de faire aboutir le pôle positif au charbon inférieur.

d. — On peut également, et cette disposition est plus commode pour les recherches de laboratoire, faire jaillir l'étincelle de la bobine Ruhmkorff entre deux fragments, taillés en pointe, du métal dont on veut observer le spectre. L'étincelle, grâce à sa haute température, volatilise des parcelles métalliques, et il suffit de l'examiner au spectroscopie pour distinguer nettement les raies propres du métal qui constitue les deux fragments entre lesquels elle jaillit.

e. — Enfin on peut encore faire jaillir l'étincelle électrique de la bobine de Ruhmkorff entre deux fils de platine dont l'un est entouré d'une solution d'un sel du métal que l'on veut étudier. C'est cette disposition qui est réalisée dans les tubes spectro-électriques de Delachanal et Mermet.

C. — VARIATIONS D'INTENSITÉ ET DE COMPOSITION SUBIES PAR LA LUMIÈRE
PENDANT SA PROPAGATION.

549. **Réflexion.** — Nous avons vu que la lumière est réfléchié régulièrement lorsqu'elle rencontre la surface de séparation bien polie de deux milieux. Cette réflexion s'accompagne toujours d'une diminution d'intensité de la lumière.

On appelle *pouvoir réflecteur* d'un corps le rapport entre l'intensité de la lumière réfléchié par la surface de ce corps et l'intensité de la lumière incidente.

On n'est pas renseigné exactement sur le pouvoir réflecteur des différents corps pour la lumière. On sait pourtant que ce pouvoir augmente avec le degré de poli de la surface réfléchissante, et qu'il diminue très notablement avec l'angle d'incidence lorsque le corps réflecteur est transparent et peu réfringent; la variation du pouvoir réflecteur avec l'incidence est au contraire en général moins notable, toutes choses égales d'ailleurs, pour les corps métalliques et

pour les corps transparents très réfringents, de plus elle n'obéit point alors à la même loi.

On peut, pour une incidence donnée, augmenter la proportion de lumière réfléchie par un corps transparent, en plaçant, sur le trajet de la lumière transmise, de nouvelles surfaces réfléchissantes analogues à la première. Si l'on accole, par exemple, plusieurs lames de verre, une certaine quantité de lumière se réfléchit à la surface de chacune d'elles et la quantité totale de lumière ainsi réfléchie augmente, dans certaines limites, avec le nombre des lames. Un tel système, qui porte le nom de *pile de glaces*, réfléchit une proportion de lumière suffisante pour éclairer certaines cavités profondes du corps humain et en permettre l'exploration avec la vue; l'observateur se place alors en arrière de la pile de glaces et reçoit dans l'œil la portion de lumière qui, diffusée par les parties éclairées du corps, a traversé les lames de verre transparentes.

Une pile de glaces constituait l'appareil réflecteur du premier modèle d'ophtalmoscope imaginé par Helmholtz.

Quant à la composition et par suite à la couleur de la lumière réfléchie, elles dépendent pour une même lumière incidente supposée complexe, de la nature du corps réflecteur. Tandis que les corps transparents ont, en général, le même pouvoir réflecteur pour toutes les radiations et donnent une lumière réfléchie de composition identique à celle de la lumière incidente, la plupart des métaux et certains autres corps, moins opaques et à aspect métallique, ont des pouvoirs réflecteurs très différents suivant la réfrangibilité des radiations pour lesquelles on les considère; la grandeur de ces différences dépend en outre de la nature du corps. La lumière réfléchie a alors une composition, et par suite une couleur, différentes de celle de la lumière incidente.

520. **Diffusion.** — Le *pouvoir diffusif* d'un corps, pour la lumière est le rapport qui existe entre l'intensité de la lumière diffusée par ce corps dans toutes les directions et l'intensité de la lumière incidente.

Le pouvoir diffusif des différents corps n'a pas été déterminé; on sait seulement que, toutes choses égales d'ailleurs, ce pouvoir est d'autant plus grand que la surface du corps est plus rugueuse. C'est grâce à la lumière qu'ils diffusent que les corps non photogènes sont visibles, et c'est à la composition de cette lumière qu'est due la couleur de ces corps.

La composition de la lumière diffusée, comme d'ailleurs celle de

la lumière réfléchie, dépend, toutes choses égales d'ailleurs, de la nature du corps considéré. Une partie de la lumière réfléchie ou diffusée a dû, en effet, pénétrer à une certaine profondeur dans le corps avant de subir une réflexion et éprouver de ce fait une absorption sur laquelle nous reviendrons dans le paragraphe suivant. La composition de cette lumière est par suite précisément celle que présenterait la lumière transmise à travers une faible épaisseur du corps considéré. Pour les corps fluorescents (§ 560), la fluorescence contribue à la coloration de la lumière diffusée.

La composition de la lumière diffusée par un corps dépend évidemment aussi de la nature de la lumière incidente. Lorsque celle-ci est blanche, les corps qui diffusent également toutes les radiations lumineuses paraissent blancs si leur pouvoir diffusif est considérable; ils ont une couleur grise d'autant plus foncée que leur pouvoir diffusif est moindre; ils paraissent noirs s'ils éteignent à peu près toutes les radiations. Leur teinte peut donc renseigner sur la valeur relative de leur pouvoir diffusif.

Un corps qui ne diffuse que les radiations rouges et les radiations vertes paraît jaune si la lumière incidente est blanche, rouge si la lumière qui l'éclaire ne renferme pas de radiations vertes, vert si cette lumière ne renferme pas de radiations rouges, et noir, si cette même lumière ne renferme, comme la lumière du sodium par exemple, ni radiations vertes, ni radiations rouges.

§21. **Absorption. Transmission.** — L'expérience montre que, lorsque la lumière traverse un corps transparent, son intensité à la sortie est moindre que son intensité à l'entrée; une portion de la lumière incidente a donc été *absorbée*. L'absorption porte d'ailleurs très inégalement, en général, sur les diverses radiations simples qui constituent la lumière incidente.

Pour chaque radiation simple, l'absorption se fait suivant la loi suivante. Considérons ⁽¹⁾ une radiation simple, d'intensité I , qui subit, en traversant une lame d'une substance quelconque dont l'épaisseur est égale à 1 , une absorption telle que son intensité soit réduite à une fraction α de sa valeur primitive et devienne donc égale à $I\alpha$. Admettons, sauf à vérifier par l'expérience l'exactitude de la conclusion à laquelle nous arriverons, que le nombre α , qui représente le rapport de l'intensité incidente I à l'intensité transmise $I\alpha$ à travers l'épaisseur 1 , soit constant quel que soit I et

(1) Nous négligeons dans ce raisonnement la perte subie par réflexion.

varie seulement avec la nature du corps traversé par la lumière. Si la radiation d'intensité Iz traverse une seconde lame identique à la première, la radiation transmise au delà de cette seconde lame aura une intensité égale à

$$(Iz) \alpha = Iz^2.$$

Par suite, la radiation transmise à travers m lames identiques à la première, ou à travers une lame de même substance que la première mais d'épaisseur m , aura, à la sortie, une intensité I' donnée par la formule :

$$I' = Iz^m \quad (1)$$

Donc, en partant de l'hypothèse relative à la constance de α , on arrive à la formule (1) qui, traduite en langage ordinaire, donne la loi suivante :

Lorsque l'épaisseur m du corps traversé par une radiation simple croit en progression arithmétique, l'intensité I' de la radiation transmise varie comme α^m , c'est-à-dire décroît en progression géométrique, puisque α est évidemment plus petit que 1.

Or, cette loi est très sensiblement vérifiée par l'expérience.

Le rapport α de l'intensité de la radiation transmise à travers une lame d'épaisseur 1, à l'intensité de la radiation incidente, est donc réellement indépendant de l'intensité de cette radiation incidente. On a donné à ce rapport α le nom de *coefficient de transmission*; sa valeur varie avec le corps traversé et avec la réfrangibilité de la radiation pour laquelle on le considère.

Les diverses valeurs que peut présenter α dans les différents corps, pour les différentes radiations lumineuses simples, rendent compte d'un certain nombre de phénomènes que nous passerons rapidement en revue.

522. **Corps transparents et corps opaques.** — Lorsque le coefficient de transmission α d'un corps pour une radiation déterminée est égal à l'unité, la formule (1) montre que I' est égal à I ; on dit alors que le corps est *absolument transparent* pour la radiation considérée. En réalité, ce cas ne se présente jamais; α est toujours plus petit que 1, mais peut cependant se rapprocher assez de l'unité pour que, si l'épaisseur m n'est pas trop grande, la radiation transmise soit à peine affaiblie; c'est le cas des corps que l'on désigne sous le nom de *transparents*. Toutefois lorsque ces corps transparents ont une épaisseur de plus en plus grande,

l'absorption atteint une valeur considérable et finit même par devenir complète; l'eau, par exemple, est à peu près absolument opaque sous une épaisseur de 100 mètres.

Si le coefficient de transmission d'un corps pour une radiation simple était égal à 0, le corps serait dit *absolument opaque* pour cette radiation. En réalité, il n'existe pas de corps absolument opaque; mais α est, pour certaines substances, si voisin de 0, que la quantité de lumière qui les traverse, même sous une faible épaisseur, ne peut impressionner notre rétine. Ces corps opaques deviennent toujours transparents lorsqu'on réduit suffisamment leur épaisseur. C'est ainsi qu'une feuille d'or, d'une épaisseur de $1/1000$ de millimètre environ, laisse passer une fraction considérable de la lumière incidente.

523. **Composition de la lumière transmise.** — Si le coefficient de transmission d'un corps était le même pour toutes les radiations, ce corps transmettrait la même fraction des diverses radiations incidentes. Le faisceau transmis, quoique affaibli, aurait par suite la même composition relative que le faisceau incident; les couleurs des deux faisceaux seraient dès lors identiques, à l'intensité près, et le corps traversé serait dit *incolore*.

En réalité, il n'y a de corps incolores que si on les considère sous une épaisseur plus ou moins faible; les coefficients de transmission d'un même corps pour les diverses radiations ne sont en effet jamais rigoureusement les mêmes. Lorsque ces coefficients diffèrent peu entre eux, les modifications de composition subies par la lumière transmise sont négligeables pour une épaisseur faible; mais ces modifications augmentent à mesure que l'épaisseur croît et finissent par être très nettement perçues par l'œil lorsque l'épaisseur est suffisante. C'est ce qui arrive en particulier avec des masses d'eau et d'air d'épaisseur considérable.

Quand les coefficients de transmission d'un corps pour diverses radiations sont assez différents, la lumière transmise, même à travers une mince couche du corps, n'a plus la même composition et par suite la même couleur que la lumière incidente.

Comme dans le cas de la réflexion et de la diffusion (§ 520), le corps traversé par la lumière est alors dit *coloré*, et nous lui attribuons la couleur que possède le faisceau transmis.

La couleur de la lumière transmise par un corps dépend donc de l'absorption que ce corps exerce sur les diverses radiations de

réfrangibilités différentes et de la nature de la lumière incidente. Le faisceau transmis par un corps qui laisse passer le vert et le rouge et éteint toutes les autres radiations sera jaune, si le corps est éclairé par de la lumière blanche; ce même faisceau transmis sera vert si la lumière incidente contient des radiations vertes, mais pas de radiations rouges, et rouge si c'est l'inverse. Enfin, il n'y aura point de lumière transmise et le corps paraîtra opaque si la lumière incidente ne renferme ni radiations vertes ni radiations rouges. Par suite, si l'on regarde un objet qui ne diffuse que du rouge à travers un verre qui ne transmet pas le rouge, cet objet paraîtra noir, alors même qu'il serait éclairé par de la lumière blanche; l'objet ne pourra donc être distingué s'il est placé sur un fond noir. C'est là une remarque qui trouvera son application, en Physique biologique, pour la recherche de la simulation de la cécité monoculaire.

524. **Spectres d'absorption.** — Nous venons de voir que les divers milieux dits colorés exercent une absorption élective sur certaines des radiations lumineuses qui les traversent. Si donc on éclaire de pareils milieux par une source lumineuse capable de donner un spectre continu et que l'on reçoive sur la fente d'un spectroscopie la lumière qu'ils diffusent ou qu'ils transmettent, le spectre obtenu présentera des plages plus ou moins sombres au niveau des régions correspondant aux radiations qui auront été plus ou moins absorbées. La position, la largeur, la netteté et le degré d'obscurité de ces plages dépendront du reste de la nature du corps et de son épaisseur.

Ces spectres portent le nom de *spectres d'absorption*. De même que les spectres d'émission, ils présentent des caractères assez différents suivant que le milieu absorbant est à l'état solide ou liquide d'une part, à l'état de gaz ou de vapeur de l'autre. Nous nous occuperons d'abord des spectres d'absorption des solides et des liquides.

525. **Spectres d'absorption des solides et des liquides.** — Pour observer ces spectres, on interpose, entre une source lumineuse fournissant un spectre continu et la fente du spectroscopie, le milieu transparent coloré; ce milieu doit être taillé en lame à faces parallèles s'il est solide, ou être placé dans une cuve à faces parallèles lorsqu'il est liquide. Des dispositions spéciales, sur lesquelles nous ne pouvons insister ici, ont d'ailleurs été imaginées afin de permettre, lorsque la chose est nécessaire, de faire varier à

volonté l'épaisseur du milieu traversé par la lumière au moment même de l'observation.

D'une manière générale, il est avantageux d'employer, pour l'étude des spectres d'absorption des solides et des liquides, des spectroscopes à un seul prisme donnant un spectre peu étalé.

Un grand nombre de milieux colorés, surtout parmi les substances minérales et les corps solides, ne donnent pas dans ces conditions de spectres d'absorption bien nets, ni bien caractéristiques, l'absorption que ces milieux exercent sur certaines radiations ne différant pas notablement de celle qu'ils exercent sur les radiations de réfrangibilité voisine. Le spectre de la lumière transmise présente seulement alors une extinction ou un affaiblissement diffus de certaines régions et ne permet donc pas de caractériser la substance qui le donne.

Certains corps, au contraire, ont un pouvoir absorbant beaucoup plus considérable pour les radiations qui correspondent à certaines régions bien délimitées du spectre que pour les radiations des régions voisines ; il en résulte que le spectre de la lumière transmise par une épaisseur convenable de ces substances présente des bandes sombres sur un fond lumineux. Le nombre et la position de ces bandes fournissent alors un moyen de caractériser les corps à l'absorption desquels elles sont dues.

Au nombre des substances qui présentent, lorsqu'on les observe sous des épaisseurs ou à des degrés de dilution convenables, des spectres d'absorption caractéristiques, nous citerons, parmi les composés minéraux, le permanganate de potasse, les sels de lanthane et de didyme, etc. ; parmi les substances organiques, la matière colorante du sang ou oxyhémoglobine et un grand nombre de ses dérivés, les matières colorantes de la bile, la chlorophylle, le carmin de cochenille, etc.

526. **Colorimétrie.** — On a fondé sur les lois de l'absorption plusieurs méthodes qui permettent de doser la matière colorante contenue dans une solution. La plus simple, mais qui est aussi la moins sensible, consiste à ramener à égalité de teinte, avec le secours de l'œil seul, deux faisceaux lumineux, qui ont traversé, l'un une solution type de concentration connue, l'autre la solution à examiner, et qui avaient une coloration identique à l'incidence. Cette méthode de dosage n'est d'ailleurs évidemment applicable que si la matière colorante à doser est identique à celle de la solution type et si elle est dissoute dans le même solvant.

On réalise l'égalité de teinte, soit en diluant convenablement la solution à doser que l'on observe alors sous la même épaisseur que la solution type, soit en maintenant constante la concentration de la solution à doser et faisant varier son épaisseur.

Lorsque l'égalité de teinte est obtenue, chaque radiation lumineuse de chacun des faisceaux a subi la même diminution d'intensité. On doit par suite conclure que chaque faisceau a rencontré, dans son passage à travers chacun des deux liquides, le même nombre de molécules absorbantes. Les concentrations des deux solutions sont donc égales si ces solutions ont, au moment où l'égalité de teinte est réalisée, la même épaisseur ; les concentrations sont en raison inverse des épaisseurs de solution traversées par les deux faisceaux, lorsque ces épaisseurs sont inégales.

Tel est le principe de la *méthode colorimétrique*, dont on fait de fréquentes applications en Médecine pour le dosage de l'hémoglobine dans divers liquides de l'organisme (sang, urine des hématuriques, etc.).

On remplace parfois la solution type par un verre coloré convenablement choisi. Cette modification, avantageuse lorsque la substance à doser est altérable et que la solution type doit donc être préparée à nouveau pour chaque observation, rend plus difficile la réalisation de l'égalité de teinte, parce qu'il est rare de trouver un verre ayant exactement la même teinte que la solution colorée à doser.

Spectro-colorimétrie. — On augmente notablement la sensibilité de la méthode colorimétrique par l'emploi du spectroscope.

On reçoit sur la fente d'un spectroscope les deux faisceaux lumineux, de même coloration à l'incidence, qui ont traversé, l'un la solution type, l'autre la solution à doser, et l'on fait en sorte que les deux spectres obtenus soient exactement superposés. On compare alors l'une des bandes d'absorption de l'un de ces spectres avec la bande correspondante de l'autre et l'on fait varier l'épaisseur de l'une des solutions jusqu'à ce que ces deux bandes aient même intensité. Lorsque ce résultat est obtenu, les concentrations sont en raison inverse des épaisseurs des solutions traversées par la lumière. Tel est le principe de la *méthode spectro-colorimétrique*.

527. *Spectres d'absorption des gaz et des vapeurs.* — Si l'on interpose, entre une source lumineuse donnant un spectre continu et la fente d'un spectroscope, un tube fermé à ses deux extrémités par des glaces parallèles et contenant une vapeur ou un gaz colorés,

le spectre que l'on observe présente des raies noires, ou des bandes obscures formées par la réunion d'un grand nombre de raies très fines. Ces raies d'absorption sont tout à fait analogues à celles du spectre solaire; leur nombre et leur position varient d'ailleurs avec la nature de la vapeur ou du gaz (ozone, acide hypoazotique, chlore, brome, iode, etc.) soumis à l'expérience.

Les gaz et les vapeurs qui nous paraissent incolores sous une faible épaisseur, présentent aussi des spectres d'absorption du genre de ceux que nous venons de décrire, lorsqu'on les examine sous une épaisseur suffisante. C'est ainsi par exemple que la vapeur d'eau et l'oxygène exercent, sur certaines radiations, une absorption élective qui se traduit par la présence dans le spectre de raies obscures au niveau des radiations absorbées.

528. **Proportionnalité des pouvoirs émissif et absorbant.** — Nous avons vu plus haut (§ 516) que les gaz et les vapeurs incandescents jouissent de la propriété d'émettre seulement certaines radiations de réfrangibilité bien déterminée, si bien que leurs spectres d'émission sont généralement constitués par un nombre plus ou moins grand de raies brillantes bien nettes et bien tranchées; ces gaz et ces vapeurs absorbent également certaines radiations. Or, l'observation montre que les radiations absorbées par un gaz ou par une vapeur incandescents sont précisément celles que ce gaz ou cette vapeur émettent dans les mêmes conditions. Ce n'est là d'ailleurs qu'un cas particulier d'un principe général de Physique, que nous avons déjà rencontré en Acoustique et que nous retrouverons dans l'étude des radiations calorifiques. Ce principe, relatif à la proportionnalité des pouvoirs émissif et absorbant d'un même corps pour les mêmes radiations, peut être énoncé sous une forme qui conduit immédiatement à en donner l'explication théorique.

En effet, chaque radiation étant caractérisée par un mouvement vibratoire d'une rapidité déterminée, la proportionnalité des pouvoirs émissif et absorbant d'un même corps pour les mêmes radiations exprime que *tout corps est capable d'absorber les radiations qu'il est susceptible d'émettre*, et cette identité entre les radiations émises et absorbées se conçoit facilement a priori. Les radiations qu'un corps peut émettre correspondent, en effet, aux mouvements vibratoires que le corps peut le plus facilement exécuter, eu égard à sa constitution. Si donc un mouvement vibratoire identique à celui que le corps peut exécuter vient à actionner ce corps, celui-ci

pourra être mis en vibration par communication du mouvement incident, de même qu'une corde peut être ébranlée par influence sous l'action d'un son de même hauteur que celui qu'elle peut rendre elle-même. Or, cette communication de mouvement correspond en somme à une perte de force vive du mouvement incident, d'après le principe de la conservation de l'énergie, ou, en d'autres termes, à une absorption de la radiation incidente dont l'intensité aura plus ou moins diminué, puisque la force vive de son mouvement aura diminué dans une proportion plus ou moins grande.

529. **Renversement des raies dans le spectre.** — Il résulte de ce qui précède que si l'on regarde au spectroscope, à travers une vapeur métallique incandescente, une source qui donnerait un spectre continu, le spectre observé doit présenter des lignes obscures précisément aux endroits où la vapeur métallique donnerait des lignes brillantes; c'est ce que l'expérience confirme et l'on dit alors que les raies sont *renversées*. Ce renversement des raies ne se produit d'ailleurs que si la lumière émise par la vapeur est moins intense que celle de la source.

Sans doute la vapeur incandescente émet, pour son propre compte, des radiations de même durée que les radiations qu'elle absorbe dans la lumière de la source; mais ces radiations sont relativement peu intenses et la région du spectre dans laquelle elles sont réparties, et où manquent les radiations plus intenses de la source, paraît obscure par rapport aux régions voisines plus vivement éclairées.

C'est Foucault qui le premier, en 1849, observa l'inversion de la raie du sodium et ce résultat fut bientôt généralisé. Brewster, puis Angström avaient déjà signalé des coïncidences entre certaines raies de Fraunhofer et les raies brillantes des spectres de diverses flammes colorées; Kirchhoff donna l'explication de ces phénomènes et établit, relativement à la constitution physique du soleil, une théorie qui rendait compte de l'origine des raies noires du spectre solaire et qui ouvrait aux recherches astronomiques une voie nouvelle des plus fécondes.

530. **Explication des raies noires du spectre solaire.** — Le spectre solaire n'est pas continu comme celui d'un solide ou d'un liquide incandescent et n'a pas, d'autre part, les caractères du spectre d'émission d'un gaz ou d'une vapeur; c'est un véritable spectre d'absorption qui présente les raies caractéristiques de l'hy-

drogène, des vapeurs du sodium, du potassium, du fer, du cobalt, etc. L'hypothèse la plus plausible pour rendre compte de ces diverses particularités consiste à admettre, avec Kirchhoff, que le soleil est constitué par un noyau solide ou liquide incandescent enveloppé d'une atmosphère gazeuse, également incandescente, qui exerce, sur la lumière à spectre continu émise par le noyau, une absorption élective relativement à certaines radiations. Les raies d'absorption qui résultent de cette constitution permettent alors de déterminer la nature des gaz ou des vapeurs traversés; c'est ainsi que l'on a pu conclure à l'existence, dans l'atmosphère solaire, de l'hydrogène, du sodium, du fer ⁽¹⁾, du cobalt, du nickel, etc. Par contre, aucune raie de Fraunhofer ne correspondant aux raies brillantes du mercure, de l'antimoine, de l'argent, du platine, de l'or, ces divers corps ne paraissent pas exister dans le soleil.

Des observations plus récentes ont confirmé la théorie de Kirchhoff sur la constitution du soleil. C'est ainsi que, en 1868, Janssen a pu observer aux Indes, pendant une éclipse totale, le spectre des *protubérances solaires* (protubérances roses que l'on aperçoit au télescope sur les bords du disque solaire). Cette observation, qui peut d'ailleurs être faite en l'absence d'éclipse comme l'ont découvert simultanément Janssen et Lokyer, a permis de distinguer très nettement, dans le spectre des protubérances, les raies brillantes de l'hydrogène. Les protubérances, dont la lumière nous arrive directement sans avoir subi d'absorption par l'enveloppe gazeuse incandescente, sont par suite constituées par des jets d'hydrogène incandescent.

Enfin, Young, de Darmouth, a pu, à la faveur de l'éclipse de 1870, observer, mais seulement pendant un temps très court et au moment où le bord du soleil allait être démasqué, un spectre constitué par un grand nombre de raies brillantes, spectre d'émission des vapeurs incandescentes de l'atmosphère solaire.

531. **Raies telluriques.** — Le spectre solaire étant un spectre d'absorption, les raies qu'il présente peuvent être dues à l'absorption qu'exerce sur la lumière émise par le noyau soit l'atmosphère solaire, comme nous l'avons dit ci-dessus, soit l'atmosphère terrestre. Les raies de Fraunhofer qui correspondent à des raies

(1) Angström et Thalén ont trouvé 460 raies du spectre solaire qui coïncidaient avec des raies brillantes du spectre d'émission du fer. De telles coïncidences ne peuvent être mises sur le compte du hasard.

brillantes de vapeurs métalliques ont évidemment une origine solaire, car la cause de leur existence ne peut être trouvée dans l'atmosphère terrestre. Il en est autrement pour un certain nombre des raies qui sillonnent le spectre du soleil. Déjà Brewster avait remarqué que le spectre du soleil, observé aux moments du lever ou du coucher de l'astre, c'est-à-dire aux moments où la couche atmosphérique traversée par ses rayons présente son maximum d'épaisseur, contenait, dans sa partie la moins réfrangible, des bandes sombres qui s'affaiblissaient ou disparaissaient lorsque le soleil était élevé au-dessus de l'horizon. Janssen, qui a pu, à l'aide d'un spectroscopie à plusieurs prismes, résoudre ces bandes en un grand nombre de raies très fines, a vérifié l'exactitude des assertions de Brewster; il a constaté en outre que ces raies disparaissaient presque complètement au sommet des montagnes élevées (Faulhorn, 2683^m, mont Blanc, 4810^m). Ces raies sont donc incontestablement d'origine terrestre; on les désigne sous le nom de raies *telluriques* ou *atmosphériques*.

M. Cornu a d'ailleurs indiqué une méthode qui permet de distinguer d'une façon certaine les raies d'origine terrestre des raies d'origine solaire. Cette méthode, basée sur un principe énoncé par Fizeau et que nous ne pouvons exposer ici, consiste à projeter alternativement les deux extrémités de l'équateur solaire, en un même point de la fente du spectroscopie, à l'aide d'une lentille qui oscille assez rapidement devant cette fente. On voit, dans ces conditions, les raies d'origine solaire osciller comme la lentille, tandis que les raies telluriques restent fixes.

Certaines raies telluriques sont dues, comme l'a montré Janssen, à la vapeur d'eau de l'atmosphère. Il a pu en effet constater leur présence dans le spectre fourni par une source terrestre et observé à travers la couche d'air saturée de vapeur qui sépare les deux rives du lac de Genève; il a pu aussi observer directement le spectre d'absorption de la vapeur d'eau, et constater l'identité de position de ses raies avec les mêmes raies telluriques du spectre solaire. On sait enfin que, même lorsque le soleil est bas sur l'horizon, ces raies telluriques disparaissent presque complètement de son spectre par un temps froid et sec.

Quant aux autres raies telluriques, on ne paraît encore fixé que sur celles de l'oxygène, dont on connaît aujourd'hui le spectre d'absorption. Janssen a pu récemment, à l'observatoire du mont Blanc, constater un affaiblissement de l'intensité de ces raies

et une diminution notable de leur nombre dans le spectre solaire.

532. **Spectre des planètes et des étoiles.** — Les planètes n'émettant point de lumière et nous renvoyant seulement la lumière solaire, le spectre qu'elles donnent à l'examen spectroscopique est identique à celui du soleil et n'en diffère que par la présence de raies obscures, dues à l'absorption que subit la lumière solaire en traversant l'atmosphère des planètes; ces raies obscures fournissent par suite des renseignements sur la composition de cette atmosphère. C'est ainsi que l'on a pu déceler la présence de la vapeur d'eau dans les atmosphères de Jupiter, de Mars et de Saturne.

Les étoiles fixes et les nébuleuses émettent au contraire une lumière propre et l'étude de leurs spectres donne de précieux renseignements sur leur constitution.

CHAPITRE II

RADIATIONS CALORIFIQUES

I. — Propagation des radiations calorifiques.

533. **Appareils pour l'étude des radiations calorifiques.** — *a.* — Pour déceler la présence de radiations calorifiques, on reçoit ces radiations sur un corps qui les absorbe et dont elles élèvent par suite la température; l'existence de radiations calorifiques est alors rendue manifeste par la variation de volume (thermomètre), ou par la production d'un courant électrique (pile thermo-électrique, bolomètre de Langley, radiomicromètre de Boys) qui résulte de l'élévation de température de l'appareil explorateur. Ce mode d'exploration, évidemment moins commode que l'observation directe des radiations lumineuses par l'organe de la vision, présente toutefois l'avantage d'être extrêmement sensible; certains des appareils que nous venons de citer révèlent en effet une variation de température qui ne dépasse pas un millionième de degré et renseignent donc sur l'intensité des radiations calorifiques beaucoup plus exactement que ne peut le faire l'œil pour les radiations lumineuses, même avec le secours des photomètres.

L'étude des radiations calorifiques exige d'ailleurs des appareils explorateurs dont la forme soit appropriée aux déterminations que l'on veut effectuer; on peut, en effet, se proposer, soit d'explor-

rer l'ensemble de la section d'un faisceau calorifique, soit d'explorer séparément diverses régions de cette section.

Lorsque les différences de température à constater ne sont pas trop minimes, on fait usage, comme appareil explorateur, de piles thermo-électriques. Ces instruments, dont nous compléterons l'étude dans le livre consacré à l'Électricité, sont constitués par un assemblage de barreaux de bismuth et d'antimoine, soudés deux à

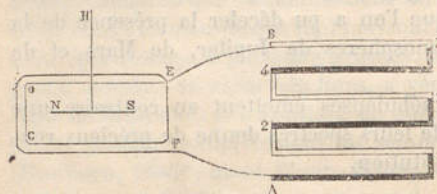


Fig. 336. — Schéma de la pile thermo-électrique.

deux et disposés de telle sorte que toutes les soudures paires (2, 4, fig. 336) soient situées d'un même côté de l'appareil, et toutes les soudures impaires (1, 3, 5) de l'autre côté. Les deux barreaux extrêmes (bismuth et anti-

moine) sont reliés par deux fils métalliques BE et AF aux bornes d'un galvanomètre. La moindre différence de température entre les soudures paires et impaires de la pile donne lieu à la production d'un courant qui se traduit par la déviation de l'aiguille NS du galvanomètre; le courant est d'ailleurs d'autant plus intense et la déviation qui en résulte pour l'aiguille d'autant plus forte que la différence de température est plus grande. De là la possibilité de constater une

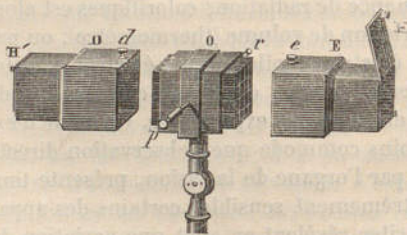


Fig. 337. — Pile thermo-électrique.

différence de température et d'en apprécier la valeur. Quand on veut pratiquer une exploration d'ensemble de la section droite d'un faisceau de radiations calorifiques, on donne à la pile thermo-électrique la forme représentée en *o* sur la figure 337; l'ensemble des barreaux constitue alors un petit cube, dont une face, celle de droite par exemple, contient toutes les soudures de rang pair, tandis que la face opposée contient toutes les soudures de rang impair; en outre, des tubes E, D, munis d'opercules H, H' peuvent être fixés aux deux extrémités de

la pile, de façon à limiter les faisceaux qui tombent sur ses deux faces. Dans le cas où l'on veut explorer séparément les diverses tranches d'un faisceau calorifique il faut employer des piles dites *linéaires*; les barreaux y sont disposés immédiatement les uns au-dessous des autres, et une fente dont la largeur est commandée par une vis de rappel, permet de régler à volonté la largeur de la tranche explorée.

b. — Les sources dont on peut vouloir étudier les radiations sont évidemment très nombreuses; on peut les diviser en deux catégo-

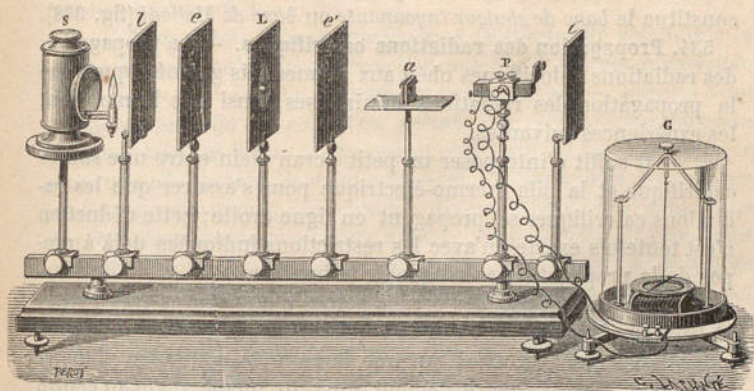


Fig. 338. — Banc de Melloni.

ries, suivant que les radiations calorifiques sont ou ne sont pas accompagnées de radiations lumineuses.

Comme source de radiations calorifiques obscures, on emploie par exemple un cube rempli d'eau maintenue à l'ébullition par une petite lampe à alcool; les faces de ce cube sont d'ailleurs constituées par des métaux différents ou sont recouvertes de substances différentes.

Lorsqu'on veut étudier les radiations calorifiques lumineuses, on a recours à une lampe aussi constante que possible, lampe de Locatelli, lampe d'Argand, etc., à une spirale de platine portée à l'incandescence par une lampe à alcool, etc.

c. — L'étude des radiations calorifiques exige, en outre, que l'on dispose d'une série d'écrans opaques; certains de ces écrans sont constitués par deux lames de métal noirci, fixées parallèlement à

une faible distance l'une de l'autre, de manière à comprendre entre elles une couche d'air dont la convection et la mauvaise conductibilité empêchent sûrement la propagation de la chaleur; d'autres sont percés d'ouvertures de grandeur variable. On fait usage enfin de plates-formes sur lesquelles on dispose la source calorifique, les corps réflecteurs, absorbants, etc.

Ces diverses parties de l'appareil sont en général munies de supports qui permettent de les faire glisser sur une règle métallique horizontale et de les fixer à telle hauteur que l'on juge convenable. L'ensemble de la pile, des écrans, de la règle, etc., constitue le *banc de chaleur rayonnante* ou *banc de Melloni* (fig. 338).

334. **Propagation des radiations calorifiques.** — La propagation des radiations calorifiques obéit aux mêmes lois géométriques que la propagation des radiations lumineuses, ainsi que le montrent les expériences suivantes.

a. — Il suffit d'interposer un petit écran plein entre une source calorifique et la pile thermo-électrique pour s'assurer que les radiations calorifiques se propagent en ligne droite; cette déduction n'est toutefois exacte qu'avec les restrictions indiquées déjà à propos de la propagation rectiligne de la lumière.

b. — On limite, par des écrans percés d'ouvertures très petites et fixés sur la règle du banc de Melloni, un pinceau de radiations calorifiques que l'on reçoit sur une lame métallique bien plane et bien polie, disposée verticalement sur cette même règle au centre d'une plate-forme horizontale, circulaire et graduée; le support de cette plate-forme porte d'ailleurs une règle supplémentaire munie d'un index et mobile autour d'un axe vertical passant par le centre de la graduation circulaire; la position de l'index sur la graduation indique à chaque instant l'angle que fait la règle supplémentaire avec la règle principale. La pile thermo-électrique est fixée sur la règle supplémentaire que l'on oriente de manière à recevoir sur la pile le faisceau réfléchi par le corps placé sur la plate-forme; lorsque ce résultat est atteint, on peut constater que les directions de la règle principale et de la règle supplémentaire, c'est-à-dire les directions des radiations incidentes et des radiations réfléchies, font des angles égaux avec la normale à la surface réfléchissante.

L'identité des lois de la réflexion pour les radiations calorifiques et lumineuses peut être encore établie en plaçant au foyer d'un miroir parabolique concave une source calorifique obscure, et disposant, en face de ce miroir, un second miroir identique, dont

l'axe principal coïncide avec celui du premier; on trouve ainsi que le maximum de chaleur est situé au foyer du second miroir, là même où se ferait l'image d'une source lumineuse qui occuperait la place de la source calorifique.

c. — En remplaçant sur la plate-forme la lame polie réfléchissante par une lame rugueuse, on vérifie que la chaleur se diffuse comme la lumière.

d. — On peut s'assurer à l'aide de lentilles en sel gemme, substance qui, comme nous le verrons plus loin, absorbe très peu les radiations calorifiques, que la chaleur se réfracte en obéissant aux mêmes lois que la lumière.

e. — Nous avons déjà vu, en étudiant le spectre du soleil, que la chaleur solaire est dispersée par son passage à travers un prisme. Il en est de même de la chaleur émise par les autres sources calorifiques, ainsi qu'on peut s'en assurer en recevant un faisceau incident très étroit sur un prisme et explorant le faisceau réfracté avec une pile thermo-électrique linéaire. Les radiations calorifiques obscures sont toutes, à des degrés divers, moins réfrangibles que les radiations lumineuses; une radiation douée à la fois de propriétés calorifiques et lumineuses présente toujours le même indice de réfraction, quelle que soit celle de ces propriétés que l'on explore.

f. — La vitesse de propagation des radiations calorifiques est la même que celle des radiations lumineuses. En effet, l'exploration calorifique de l'image du soleil, donnée par un instrument d'optique, permet de constater que l'image calorifique coïncide avec l'image lumineuse de l'astre; or, par suite de l'aberration due à la vitesse de translation de la terre, la coïncidence de ces deux images calorifique et lumineuse ne peut exister que si les vitesses de propagation de la lumière et de la chaleur, rayonnées par le soleil, sont égales entre elles.

II. — Intensité et composition des radiations calorifiques émises par les différentes sources.

A. — INTENSITÉ.

535. **Pouvoir émissif.** — Les radiations calorifiques émises par les différentes sources calorifiques peuvent différer, soit par leur intensité, soit par leur nature. Comme nous l'avons fait pour la lumière, nous nous occuperons d'abord de l'intensité.

On appelle *pouvoir émissif calorifique total* d'un corps la quantité de chaleur rayonnée pendant l'unité de temps dans toutes les directions par l'unité de surface de ce corps (1).

La valeur de ce pouvoir se déduit de la quantité de chaleur que le corps rayonne sur une surface connue placée dans des conditions bien définies. Toutes choses égales d'ailleurs, cette quantité de chaleur varie, comme la quantité de lumière, avec la distance de la surface à la source et avec l'inclinaison de la surface par rapport aux rayons incidents; les lois de ces variations sont, comme nous allons le voir, identiques aux lois correspondantes relatives à la lumière.

536. Loi de l'inverse du carré des distances et loi du cosinus.

— Les raisonnements que nous avons faits à propos des radiations lumineuses s'appliquent de tout point aux radiations calorifiques.

La quantité de chaleur qu'une source calorifique réduite à un point, ou suffisamment petite pour que ses dimensions soient négligeables par rapport aux distances à considérer, envoie sur une surface normale à la direction des radiations est donc en raison inverse du carré de la distance de cette surface à la source.

On démontrerait en outre, comme pour la lumière, que la quantité de chaleur reçue par une surface est proportionnelle au cosinus de l'angle que la normale à la surface fait avec la direction du faisceau des radiations calorifiques incidentes.

537. — Mesure du pouvoir émissif relatif. — Les mesures expérimentales ont porté jusqu'ici, moins sur le pouvoir émissif total des corps considérés isolément que sur la comparaison de ces pouvoirs dans une direction donnée, c'est-à-dire sur la détermination des *pouvoirs émissifs relatifs* ou du rapport des quantités de chaleur émises par une même surface de divers corps dans les mêmes conditions.

Les corps dont on veut comparer les pouvoirs émissifs doivent être évidemment portés à la même température. Pour obtenir ce résultat, on en recouvre, par exemple, les faces d'un cube rempli d'eau maintenue à l'ébullition par une lampe à alcool. Ces corps doivent être disposés chacun à la même distance de la pile dont

(1) Le pouvoir émissif absolu d'un corps est la quantité de chaleur émise pendant une seconde dans le vide, lorsque le corps est à une température supérieure de 1° à celle de l'enceinte. On ne s'est généralement pas placé dans le vide pour faire les déterminations des quantités de chaleur émises et l'on a donc mesuré le pouvoir émissif dans l'air.

l'inclinaison, par rapport aux rayons incidents, doit être le même dans chaque détermination; en outre la surface chaude qui émet les radiations doit avoir toujours la même orientation par rapport à la pile thermo-électrique; enfin, au moyen de diaphragmes convenablement choisis et convenablement placés, on doit limiter d'une façon invariable les faisceaux calorifiques envoyés par chaque corps. Il suffit alors de comparer les déviations de l'aiguille du galvanomètre produites par chaque corps pour en déduire, grâce à une graduation préalable, le rapport des quantités de chaleur reçues par la pile ou envoyées par les corps dans la direction de cette pile et par suite le rapport des pouvoirs émissifs de ces corps dans la direction considérée.

538. **Pouvoirs émissifs relatifs des différents corps.** — On est convenu de comparer le pouvoir émissif des différents corps à celui du noir de fumée placé dans les mêmes conditions.

C'est à Leslie, à Melloni, à de la Provostaye et Desains que sont dues les principales déterminations. En employant le cube, chauffé à 100°, dont les faces étaient recouvertes des substances à comparer et en désignant par 1 le pouvoir émissif du noir de fumée dans la direction normale, on a trouvé, pour le pouvoir émissif de différents corps dans la direction normale, les valeurs suivantes :

Blanc de céruse.....	1,000
Colle de poisson	0,91
Encre de Chine.....	0,85
Gomme laque.....	0,72
Fer.....	0,23
Platine laminé.....	0,108
— bruni.....	0,095
Argent mat chimiquement déposé.....	0,054
Or en feuille.....	0,043
Argent bruni.....	0,025
— chimiquement déposé bruni.....	0,022

539. **Causes qui font varier, pour un même corps, la valeur de son pouvoir émissif.** — 1° *Épaisseur.* — Leslie, en passant sur l'une des faces du cube des couches successives d'un vernis à la gomme laque très étendu, a montré que le pouvoir émissif d'un corps varie avec son épaisseur, tant que cette épaisseur n'a pas atteint une certaine valeur, d'ailleurs très faible. L'émission de la chaleur ne dépend donc pas seulement de la couche superficielle de molécules, mais encore des premières couches sous-jacentes.

2° *État physique.* — Le tableau ci-dessus montre que le pouvoir

émisif d'un même corps, platine, argent, dépend de l'état physique de la surface du corps.

D'après Masson et Courtépée, les métaux qui, polis, possèdent des pouvoirs émissifs très faibles et très différents, auraient tous même pouvoir émissif que le noir de fumée, lorsqu'ils sont à l'état de poudre impalpable, tels qu'on peut les obtenir par des réactions chimiques. Ces résultats n'ont pas été entièrement confirmés par les recherches plus récentes de Tyndall, mais il n'en reste pas moins établi que le pouvoir émissif d'un corps à l'état pulvérulent est plus grand que celui du même corps poli.

3° *Inclinaison*. — Le pouvoir émissif d'un corps dépend de la direction suivant laquelle on le considère.

Disposons, en effet, en face de la pile, la face du cube recouverte de noir de fumée par exemple, et plaçons sur la direction du faisceau calorifique émis deux diaphragmes à ouvertures égales afin d'obtenir un faisceau incident sensiblement parallèle. L'expérience montre que la déviation du galvanomètre reste constante quelle que soit l'orientation que l'on donne à la face recouverte de noir de fumée par rapport à l'axe du faisceau reçu par la pile.

La quantité de chaleur qui tombe sur la pile est donc la même dans tous les cas. Or la section droite du faisceau incident, limité par les deux ouvertures des diaphragmes, n'ayant pas varié, on doit conclure de ce qui précède que la quantité de chaleur qui, rayonnée par le noir de fumée vers la pile, traverse dans un même temps la section droite constante du faisceau est indépendante de l'orientation de la surface qui émet les radiations.

Mais pendant que l'on fait tourner la face du cube, la portion de cette face, qui rayonne à travers les ouvertures des deux diaphragmes vers la pile, augmente avec l'inclinaison, et son étendue est inversement proportionnelle au cosinus de l'angle que la normale à la surface d'émission fait avec la direction du faisceau incident. Donc, puisque la déviation du galvanomètre reste constante, la quantité de chaleur rayonnée pendant le même temps dans une direction quelconque par l'unité de surface du noir de fumée, et par suite le pouvoir émissif du noir de fumée dans une direction quelconque, est proportionnel au cosinus de l'angle que cette direction fait avec la normale à la surface d'émission.

Cette loi, que Fourrier était arrivé à établir par des considérations théoriques et qu'il croyait générale, ne se vérifie que pour le noir de fumée mat et pour les corps qui, comme lui, ont un pouvoir

diffusif et un pouvoir réflecteur sensiblement nuls. Le noir de fumée déposé à l'essence, qui réfléchit la chaleur dans une proportion sensible, commence à s'écarter de la loi. En général le pouvoir émissif diminue plus vite que le cosinus de l'inclinaison.

4^o *Température.* — Le pouvoir émissif d'un corps augmente avec l'excès de la température de ce corps sur celle de l'enceinte; il suffit, pour s'en assurer, de remplacer l'eau du cube qui a servi aux expériences précédentes par de l'huile. L'une des faces du cube étant tournée vers la pile, on élève progressivement la température de l'huile à l'aide d'une lampe à alcool et l'on constate que, toutes choses égales d'ailleurs, la déviation de l'aiguille du galvanomètre est à chaque instant d'autant plus grande que cette température est elle-même plus élevée.

La loi suivant laquelle varie le pouvoir émissif d'un corps avec la température dépend de la nature de ce corps.

Toutefois lorsque l'excès t de la température d'un corps quelconque sur celle de l'enceinte est suffisamment petit (20° au maximum), on peut admettre que le pouvoir émissif de ce corps est, pour une même température de l'enceinte, proportionnel à l'excès t .

540. **Refroidissement par rayonnement.** — Lorsqu'un corps chaud est placé dans une enceinte vide, de forme invariable, dont la température est inférieure à la sienne, la quantité de chaleur qu'il perd par rayonnement, pendant une seconde, quantité évidemment égale à celle qu'il émet dans le même temps, dépend de la dimension et de la forme de sa surface, ainsi que du pouvoir émissif du corps; ce pouvoir émissif dépend lui-même de l'épaisseur de la couche rayonnante, de la nature du corps considéré, de l'état de la surface, de l'excès de la température du corps sur celle de l'enceinte et de la température de cette enceinte. La quantité de chaleur perdue pendant l'unité de temps dépend encore, comme nous le montrerons plus loin, de la forme, des dimensions et de la nature de l'enceinte. Si le corps rayonnant, au lieu d'être placé dans le vide, est placé dans l'air ou dans un gaz quelconque, il éprouvera en outre une perte de chaleur par conductibilité et surtout par convection.

Par suite, lorsqu'aucune source ne fournit de la chaleur au corps pour remplacer celle qu'il perd, le corps se refroidit et l'excès de sa température sur celle de l'enceinte varie à chaque instant. Si donc l'on désigne par Q la quantité de la chaleur perdue pendant une

seconde, par P le poids du corps et par C sa chaleur spécifique, l'abaissement n de température subi en une seconde satisfera à la relation :

$$PCn = Q,$$

en supposant le corps suffisamment conducteur pour que toutes ses parties se mettent immédiatement en équilibre de température avec sa surface, qui seule est le siège du refroidissement.

L'abaissement n de température pendant l'unité de temps, ou la vitesse de refroidissement, dépendra donc, non seulement de P et de C , mais encore de toutes les causes qui font varier Q et que nous avons énumérées ci-dessus. Nous étudierons successivement l'influence des principales de ces causes.

1° *Influence du pouvoir émissif du corps.* — Toutes choses égales d'ailleurs, le refroidissement d'un corps sera d'autant plus lent ou d'autant plus rapide que le pouvoir émissif de ce corps, dans les conditions où il est placé, sera plus faible ou plus considérable. Aussi fabrique-t-on en cuivre doré ou en argent les vases des calorimètres et les récipients destinés, comme les théières par exemple, à contenir un liquide chaud dont on veut éviter autant que possible le refroidissement. Nous avons vu en effet (§ 538) que le pouvoir émissif des métaux polis, et en particulier de l'or et de l'argent, est beaucoup plus faible que celui des autres corps. Si l'on veut au contraire activer le refroidissement d'un corps il faudra recouvrir sa surface d'une substance, noir de fumée par exemple, dont le pouvoir émissif soit considérable. Toutes choses égales d'ailleurs, la température de la surface d'un corps s'abaissera encore d'autant plus rapidement que le corps sera plus mauvais conducteur, car la chaleur perdue par le rayonnement des couches superficielles est alors d'autant moins vite remplacée par la chaleur intérieure. Aussi est-ce sur les corps mauvais conducteurs que se montre d'abord le dépôt de rosée, lorsque le refroidissement a lieu au sein d'une atmosphère humide.

2° *Influence de l'excès de la température du corps sur celle de l'enceinte. Loi de Newton.* — Pour un même corps, dont la forme, les dimensions et l'état de la surface restent invariables, et pour une même température d'une même enceinte, la vitesse de refroidissement, si aucune cause autre que le rayonnement n'intervient pour modifier la température du corps, ne dépend que de l'excès t de cette température sur celle de l'enceinte.

Soient, en effet, P et C le poids et la chaleur spécifique d'un corps, et q la quantité de chaleur que perd ce corps dans l'unité de temps par suite de l'excès t de sa température sur celle de l'enceinte.

L'abaissement n de sa température sera donnée par la formule :

$$PCn = q. \quad (1)$$

Lorsque l'excès de la température du corps sur celle de l'enceinte sera devenue égal à t' par exemple, la quantité de chaleur perdue pendant l'unité de temps aura une valeur q' différente de q et l'abaissement n' de température sera donné par la nouvelle formule :

$$PCn' = q'. \quad (2)$$

Divisant (1) et (2) membre à membre, il vient :

$$\frac{n}{n'} = \frac{q}{q'};$$

or q et q' sont évidemment proportionnels, dans les conditions où nous nous sommes placés, aux valeurs que présentent les pouvoirs émissifs du corps considéré pour les excès t et t' .

Mais lorsque l'excès t ne dépasse pas 20° , les pouvoirs émissifs d'un même corps sont eux-mêmes proportionnels aux excès t et t' ; on aura donc :

$$\frac{q}{q'} = \frac{t}{t'}$$

et par suite :

$$\frac{n}{n'} = \frac{t}{t'},$$

relation qui, traduite en langage ordinaire, constitue cette loi, dite de Newton :

Pour un même corps et pour une même température de l'enceinte, quels que soient du reste cette température et ce corps, la vitesse de refroidissement est à chaque instant proportionnelle à l'excès t de la température du corps sur celle de l'enceinte.

Cette loi s'applique aussi au cas où le refroidissement a lieu dans l'air, la perte de chaleur qu'éprouve le corps par conductibilité ou par convection étant négligeable par suite de la faible valeur de l'excès t .

Pour vérifier l'exactitude de la loi de Newton dans l'air, il suffit de suspendre dans une même enceinte, à une certaine distance

l'un de l'autre, deux thermomètres dont l'un indique la température T de cette enceinte, température que nous supposerons égale à 20° par exemple, tandis que l'autre, dont le réservoir a été recouvert d'une substance quelconque, a été préalablement porté à une température supérieure d'environ 20° à celle de l'enceinte. Si, pendant que ce second thermomètre se refroidit, on note les temps nécessaires pour que la température passe de 30° à 29° , puis de 25° à 24° , on constate que le premier de ces temps est moitié du second ; la vitesse de refroidissement est donc double lorsque l'excès de la température du corps qui se refroidit sur la température de l'enceinte est deux fois plus grand.

3^e *Influence de la forme, des dimensions et de la nature de l'enceinte.* — Toutes choses égales d'ailleurs, la vitesse de refroidissement d'un même corps dépend de la forme et de la dimension de l'enceinte dans laquelle il est placé, ainsi que de la nature des corps qui la composent, comme il est facile de s'en rendre compte d'après les considérations suivantes.

D'une part, en effet, les différents corps diffusent et absorbent les radiations calorifiques qu'ils reçoivent, dans des proportions qui varient suivant diverses conditions indiquées plus loin ; d'autre part, la chaleur absorbée par les corps sert à élever leur température. On conçoit, dès lors, que si un corps chaud A se trouve environné d'autres corps, la température de ceux-ci s'élèvera en raison de la quantité de chaleur qu'ils auront absorbée, tandis que les radiations rayonnées et diffusées ⁽¹⁾ par ces mêmes corps vers A compenseront en partie les pertes que le corps A subit par rayonnement.

Toutes choses égales d'ailleurs, la vitesse de refroidissement d'un corps sera par suite d'autant moindre que l'enceinte dans laquelle il est placé sera elle-même plus petite et que les corps qui la constituent diffuseront et absorberont plus de chaleur. Cela explique pourquoi il suffit de disposer un écran, ou un abri, au-dessus d'un corps, pour empêcher que la rosée ne se dépose sur ce corps tandis qu'elle recouvre les corps voisins, librement exposés comme lui au contact de l'air humide pendant une nuit sereine. L'écran agit en effet pour modifier l'enceinte dans laquelle s'effectue le rayonnement ; le corps qui rayonnait vers les espaces célestes,

(1) Pour simplifier nous ne tenons pas compte ici de la chaleur réfléchie qui n'intervient que dans certaines conditions.

rayonne maintenant vers l'écran, et sa vitesse de refroidissement est notablement ralentie. L'action de l'écran est d'ailleurs plus ou moins efficace, suivant sa nature, son étendue, etc. Les nuages agissent comme l'écran que nous venons de considérer; le dépôt de rosée est, toutes choses égales d'ailleurs, moins abondant par un temps couvert que par un temps serein.

541. **Équilibre mobile des températures.** — On admet que, lorsque plusieurs corps à des températures différentes sont en présence, chacun émet des radiations en quantité d'autant plus considérable que sa température est plus élevée. De là résulte un accroissement de température des corps les moins chauds; on conçoit dès lors que, après un temps suffisant, tous les corps inégalement chauds d'une enceinte arrivent à une température stationnaire et la même pour tous, si aucun de ces corps n'est le siège d'une source de chaleur. A partir de ce moment, chaque corps rayonne, pendant chaque unité de temps, une quantité de chaleur égale à celle que lui envoient, durant le même intervalle, les autres corps de l'enceinte.

C'est en cela que consiste l'hypothèse dite de l'*équilibre mobile de températures*.

B. — NATURE DES RADIATIONS CALORIFIQUES ÉMISES PAR LES DIFFÉRENTS CORPS.

542. **Spectres calorifiques d'émission.** — Pour déterminer la composition de la chaleur émise par un corps, il faut décomposer cette chaleur par un prisme, c'est-à-dire produire le spectre calorifique du corps. L'étude de la partie la moins réfrangible de ce spectre doit être faite, en raison de l'invisibilité des radiations qui la constituent, au moyen d'appareils thermoscopiques (pile thermo-électrique linéaire, bolomètre, etc.); les radiations calorifiques de la partie la plus réfrangible jouissant de la propriété d'impressionner notre rétine, leur étude peut être faite directement par l'œil.

Nous avons déjà indiqué, à propos des radiations lumineuses (§§ 515 et 516), les diverses particularités relatives aux spectres calorifiques; il suffit donc de rappeler brièvement les principaux résultats de l'exploration de ces spectres. Les radiations émises par un corps chauffé sont de plus en plus réfrangibles à mesure que la température du corps s'élève; le spectre est continu aussi bien

dans la partie obscure que dans la partie lumineuse (quand elle existe), si le corps chauffé est à l'état solide ou liquide; le spectre est discontinu, si le corps qui émet les radiations est à l'état de gaz ou de vapeur.

C. — VARIATIONS D'INTENSITÉ ET DE COMPOSITION SUBIES PAR LA CHALEUR
PENDANT SA PROPAGATION.

543. **Réflexion.** — La réflexion de la chaleur, de même que celle de la lumière, s'accompagne toujours d'une diminution d'intensité.

On appelle *pouvoir réflecteur* d'un corps le rapport entre la quantité de chaleur que ce corps réfléchit régulièrement et la quantité de chaleur qu'il reçoit.

Pour évaluer le pouvoir réflecteur d'un corps à l'aide du banc de Melloni, on fixe une lame du corps le plus loin possible de la source, au centre de la plate-forme déjà décrite (§ 534, *b*), et l'on dispose la surface réfléchissante suivant une direction oblique par rapport au faisceau calorifique incident que l'on limite au moyen de diaphragmes percés d'ouvertures égales. La pile thermo-électrique étant alors montée sur la règle supplémentaire, on oriente cette règle de telle sorte que la pile reçoive le faisceau réfléchi et l'on note la déviation du galvanomètre; puis, après avoir supprimé le corps réflecteur, on fait tourner la règle supplémentaire de façon à la placer dans le prolongement de la règle principale et à recevoir le faisceau incident lui-même sur la pile qui se trouve, à ce moment, à une distance de la source précisément égale au chemin parcouru par la chaleur pour arriver jusqu'à cette même pile lorsque celle-ci était sur le trajet du faisceau réfléchi. On note la nouvelle déviation du galvanomètre et, du rapport des deux déviations, on déduit le rapport des quantités de chaleur incidente et réfléchie, ou le pouvoir réflecteur du corps soumis à l'expérience.

On trouve ainsi que le pouvoir réflecteur d'un même corps augmente avec le degré de poli de sa surface. Le pouvoir réflecteur des corps transparents pour la chaleur (*diathermanes*) et celui de certains corps non transparents (*athermanes*) autres que les métaux, augmente très rapidement quand l'incidence augmentent; il n'en est plus de même pour les métaux et pour certains corps diathermanes à aspect métallique, dont le pouvoir réflecteur varie très peu avec l'incidence; tous résultats analogues à ceux que l'on constate dans la réflexion de la lumière.

Relativement à la composition de la chaleur réfléchie, les résultats sont encore analogues à ceux que nous avons indiqués pour les radiations lumineuses. Les métaux (argent et métal des miroirs exceptés) et les corps à aspect métallique ont des pouvoirs réflecteurs très différents pour les diverses radiations calorifiques; la valeur de ces différences dépend d'ailleurs de la nature du corps. Il résulte de là que la constitution de la chaleur réfléchie n'est pas alors la même que celle de la chaleur incidente supposée complexe, et que les modifications subies par cette chaleur, lors de sa réflexion, varient avec la nature du corps réflecteur. Les corps diathermanes et certains corps athermanes non métalliques ont au contraire le même pouvoir réflecteur pour toutes les radiations calorifiques et ne modifient point par suite la composition de la chaleur réfléchie; l'intensité du faisceau réfléchi est seulement plus ou moins grande suivant le corps considéré et les conditions de l'expérience.

544. **Diffusion.** — On appelle *pouvoir diffusif total* d'un corps le rapport de la quantité de chaleur que ce corps diffuse dans toutes les directions à la quantité de chaleur qu'il reçoit.

La pile thermo-électrique permet de mesurer le pouvoir diffusif d'un corps dans une direction déterminée quelconque, c'est-à-dire le rapport entre la quantité de chaleur diffusée dans cette direction et la quantité de chaleur reçue. Il faut toutefois, pour effectuer ces mesures, prendre des précautions spéciales afin d'éliminer la chaleur normalement rayonnée par le corps qui s'échauffe sous l'action de la chaleur reçue, ou tenir compte de cette chaleur rayonnée qui vient s'ajouter à la chaleur diffusée.

Le pouvoir diffusif varie avec la direction suivant laquelle on le mesure. De la Provostaye et Desains ont établi la loi de cette variation dans le cas où la chaleur reçue par le corps diffusant était normale à la surface, et ont pu par suite déterminer le pouvoir diffusif total de certaines substances dans ces conditions.

Voici les valeurs qu'ils ont obtenues pour la diffusion de la chaleur solaire, en représentant par 1 la quantité de chaleur incidente :

Céruse	0,82
Argent en poudre.....	0,76
Chromate de plomb.....	0,66
Cinabre.....	0,48

Le pouvoir diffusif total augmente lorsque l'angle que fait la cha-

leur incidente avec la surface diffusante augmente lui-même ; mais on ignore la loi de ces variations.

Le pouvoir diffusif diminue pour un même corps à mesure que le degré de poli de sa surface augmente.

Le pouvoir diffusif peut encore varier, pour un même corps, avec la réfrangibilité de la chaleur incidente. Il résulte en effet des expériences de Melloni et de Knoblauch que certains corps diffusent inégalement les diverses radiations calorifiques ; la chaleur diffusée par ces corps ne présente donc pas la même composition que la chaleur incidente, lorsque celle-ci n'est pas homogène. Ces corps sont, au point de vue des radiations calorifiques, les analogues des corps dits colorés par rapport aux radiations lumineuses ; on dit qu'ils sont doués de *thermochrose*. A cette catégorie appartiennent la céruse qui diffuse surtout les radiations calorifiques les plus réfrangibles, l'or, l'argent, le mercure, le cuivre, le laiton qui diffusent très peu les radiations calorifiques jaunes, et qui ont même thermochrose, même couleur calorifique, quoique leurs couleurs lumineuses soient très différentes. D'autres corps, le platine, le fer, l'étain, le zinc et le plomb diffusent, au contraire, d'après Knoblauch, toutes les radiations calorifiques également et la chaleur qu'ils diffusent présente toujours même composition que la chaleur incidente ; ces corps, dénués de thermochrose, sont les analogues des corps blancs, gris ou noirs suivant que la valeur de leur pouvoir diffusif est plus ou moins grande. Toutefois il n'y a pas de corps absolument *noirs* pour la chaleur, c'est-à-dire de corps qui absorbent toute la chaleur qu'ils reçoivent. Le noir de fumée, qui a longtemps été considéré comme satisfaisant à cette condition, diffuse en réalité une faible proportion de la chaleur incidente, mais cette proportion est indépendante de la nature de cette chaleur ; le noir de fumée est absolument dénué de thermochrose.

545. **Absorption.** — Quand un faisceau de radiations calorifiques rencontre la surface de séparation de deux milieux, la portion de chaleur qui n'est ni réfléchie ni diffusée dans le premier milieu pénètre dans le second et, si ce second milieu est indéfini, y est toujours entièrement absorbée après un trajet plus ou moins long suivant la nature de ce milieu. On appelle *pouvoir absorbant* d'un corps le rapport de la quantité de chaleur ainsi absorbée à la quantité de chaleur incidente.

Si l'on représente par Q la quantité de chaleur qui tombe sur un corps sous une incidence quelconque i , par r , d , a les pouvoirs ré-

reflecteur, diffusif total et absorbant du corps dans ces conditions, on aura :

$$Q = Qr + Qd + Qa,$$

ou :

$$1 = r + d + a;$$

d'où :

$$a = 1 - (r + d). \quad (1)$$

Le pouvoir absorbant d'un corps dans des conditions déterminées est donc la différence entre l'unité et la somme des pouvoirs réflecteur et diffusif total du corps dans les mêmes conditions.

Les lois suivant lesquelles varie le pouvoir absorbant d'un corps sont par conséquent corrélatives de celles qui régissent les variations de ses pouvoirs réflecteur et diffusif total.

Le pouvoir absorbant d'un corps peut se déduire de la formule (1) si l'on connaît les pouvoirs réflecteur et diffusif total. Cette formule se simplifie d'ailleurs dans quelques cas ; pour les corps bien polis par exemple, le pouvoir diffusif est négligeable et la formule (1) se réduit à :

$$a = 1 - r;$$

pour les corps rugueux, au contraire, c'est le pouvoir réflecteur qui est nul et il vient :

$$a = 1 - d.$$

Le pouvoir absorbant est donc, suivant le cas, complémentaire du pouvoir réflecteur ou du pouvoir diffusif total.

On a pu d'ailleurs évaluer directement, par une méthode que nous ne pouvons rapporter ici, les rapports des pouvoirs absorbants de divers corps à celui du noir de fumée choisi comme unité.

Les déterminations directes ou indirectes du pouvoir absorbant ont conduit aux résultats suivants :

Le pouvoir absorbant d'un corps dépend de sa nature ; ce pouvoir varie, pour un même corps, avec l'état de la surface de ce corps, et diminue à mesure que l'inclinaison de la chaleur incidente augmente ; enfin le pouvoir absorbant dépend encore de la nature de la chaleur incidente, pour tous les corps dont le pouvoir réflecteur ou le pouvoir diffusif varient avec la réfrangibilité de la radiation considérée.

Le pouvoir absorbant du blanc de céruse par exemple, rapporté à celui du noir de fumée pris pour unité, est égal à 1 pour la chaleur émise par le cuivre à 100° ; il n'est que de 0.21 pour la chaleur de la lampe d'Argant et de 0.09 pour la chaleur solaire.

Ajoutons que l'intensité et la nature de la lumière diffusée par une substance dénuée de pouvoir réflecteur, renseignent immédia-

tement sur la proportion et la nature des radiations calorifiques lumineuses absorbées par cette substance ; toute substance blanche par exemple absorbe moins de chaleur lumineuse qu'une substance grise, et celle-ci moins encore qu'une substance noire.

546. **Égalité du pouvoir émissif et du pouvoir absorbant.** — Si l'on compare le pouvoir émissif d'un corps porté à 100° à son pouvoir absorbant à la température ordinaire, dans les mêmes conditions d'inclinaison, pour la chaleur émise par un corps à 100°, on constate que les deux pouvoirs émissif et absorbant, rapportés aux pouvoirs correspondants du noir de fumée, sont égaux ; cette égalité ne persiste pas quand on compare le pouvoir émissif d'un corps porté à 100° à son pouvoir absorbant pour la chaleur solaire. Si l'on remarque que, dans le premier cas, les radiations pour lesquelles on a mesuré le pouvoir absorbant ont été émises à la même température que celle à laquelle a été mesuré le pouvoir émissif, et que l'absorption du corps a porté sur des radiations identiques aux radiations émises par ce corps, conditions qui ne se trouvent plus réalisées dans le second cas, on peut dire que :

Le rapport du pouvoir émissif d'un corps au pouvoir émissif du noir de fumée à la même température t est égal au rapport des pouvoirs absorbants du corps et du noir de fumée à cette même température t, pourvu que ces divers pouvoirs soient mesurés dans les mêmes conditions d'inclinaison, pour une même radiation λ , et pourvu qu'à la température t le noir de fumée émette la radiation λ .

Les considérations générales que nous avons indiquées précédemment (§ 528) pour faire comprendre comment un corps peut absorber les mouvements vibratoires qu'il est capable d'émettre, s'appliquent évidemment à l'émission et à l'absorption des radiations calorifiques.

547. **Transmission.** — *a.* — Si, au lieu de considérer un milieu indéfini, comme nous l'avons fait plus haut (§ 545), nous supposons que le milieu rencontré par la chaleur ait des dimensions finies, la chaleur qui pénètre dans ce milieu ne sera généralement pas absorbée toute entière.

La loi suivant laquelle varie, avec l'épaisseur du corps traversé, l'intensité d'une radiation calorifique transmise est identique à celle que nous avons indiquée à propos de la transmission des radiations lumineuses et s'établit de la même manière. Cette loi s'exprime par la formule :

$$I = I_0 e^{-\alpha x},$$

dans laquelle I représente l'intensité de la radiation transmise, I_0 celle de la radiation incidente, m l'épaisseur du corps traversé, α un coefficient, dit *coefficient de transmission*, qui dépend de la nature du corps traversé et de la réfrangibilité de la radiation étudiée.

Pour un même corps et une même radiation douée à la fois de propriétés calorifiques et lumineuses, le coefficient de transmission est le même, soit qu'on le détermine à l'aide d'un photomètre pour les propriétés lumineuses, soit qu'on le mesure au moyen d'une pile thermo-électrique, pour les propriétés calorifiques.

b. — Suivant qu'un corps posséderait un coefficient égal à 1 ou à 0 pour une radiation calorifique, il n'imprimerait aucun affaiblissement à cette radiation quelle que fût son épaisseur ou l'absorberait entièrement; dans le premier cas ce corps serait dit absolument *diathermane* pour cette radiation, il serait appelé *athermane* dans le second cas. En réalité, il n'y a pas plus de corps absolument *diathermanes* ou absolument *athermanes* qu'il n'y a de corps absolument transparents ou absolument opaques. Les métaux, sous une faible épaisseur, sont sensiblement *athermanes* pour toutes les radiations calorifiques; le sel gemme en lame mince est sensiblement *diathermane* pour toutes ces radiations.

c. — Lorsqu'un corps a le même coefficient de transmission pour toutes les radiations calorifiques, un faisceau de chaleur incidente n'est nullement modifié, quelle que soit sa composition, par son passage à travers le corps. C'est ce qui arrive sensiblement avec le sel gemme qui, sous une même épaisseur, transmet à peu près la même proportion de toutes les radiations calorifiques. Comme de plus la proportion de radiations transmises est assez considérable, pourvu que l'épaisseur traversée ne soit pas trop grande, c'est en sel gemme que l'on fabrique les lentilles ou les prismes destinés à l'étude des radiations calorifiques.

d. — En général, le coefficient α varie, pour un même corps, avec la réfrangibilité de la radiation calorifique considérée; le passage de la chaleur à travers de tels corps modifie donc la composition de la chaleur incidente, si celle-ci n'est point homogène; mais la chaleur transmise et la chaleur absorbée pendant le trajet à travers le corps sont toujours complémentaires et leur mélange, s'il était possible de le réaliser, reconstituerait la chaleur incidente, en admettant qu'il n'y ait eu ni réflexion, ni diffusion sensible. Certains corps qui, pris sous une épaisseur convenable, sont à peu

près absolument transparents pour la lumière et par suite pour la chaleur lumineuse, sont au contraire presque complètement opaques, sous la même épaisseur, pour la chaleur obscure. C'est ainsi qu'une lame d'alun transmet sensiblement dans le même rapport toutes les radiations lumineuses, tandis qu'elle absorbe les radiations infra-rouges en proportion d'autant plus considérable que leur réfrangibilité est moindre. La glace et l'eau liquide se comportent d'une façon analogue et il en est encore de même du cristal de roche et du verre ; toutefois, la proportion de chaleur obscure absorbée est déjà bien moindre, toutes choses égales d'ailleurs, pour ces deux dernières substances que pour l'alun.

Les milieux transparents de l'œil jouissent également de la propriété d'absorber la majeure partie des radiations calorifiques obscures.

Il existe au contraire des corps qui sont opaques pour toutes les radiations lumineuses et transparents pour la chaleur obscure. Tel est le cas d'une lame de sel gemme recouverte de noir de fumée ; il en est de même d'une variété de quartz connue sous le nom de quartz enfumé, et, comme l'a démontré Tyndall, d'une solution d'iode dans le sulfure de carbone. On peut allumer de l'amadou ou du fulmi-coton au foyer d'un ballon sphérique rempli d'une telle solution et placé sur le trajet d'un faisceau de radiations solaires.

e. — L'étude de la transmission de la chaleur à travers les gaz et les vapeurs est entourée de grandes difficultés. Tyndall avait trouvé que la vapeur d'eau était très peu transparente pour la chaleur obscure, mais ce fait a été contesté par Magnus qui regarde l'air humide comme à peu près aussi transparent pour la chaleur que l'air sec ; il paraît toutefois résulter des expériences plus récentes de Hoorweg et de Haga que la vapeur d'eau, sans être aussi opaque pour les radiations calorifiques obscures que le pensait Tyndall, ne présente pourtant pas, pour ces radiations, la transparence que leur attribuait Magnus. Ce qu'il y a de certain, c'est que les gaz et les vapeurs ont, à une température suffisamment élevée, des coefficients de transmission très différents pour des radiations calorifiques de réfrangibilités très voisines ; aussi leurs spectres obscurs d'absorption présentent-ils des raies froides qui occupent du reste, conformément à l'égalité des pouvoirs émissif et absorbant, la même position dans ces spectres que les raies chaudes des spectres d'émission correspondants. Il existe un grand nombre de

ces raies froides dans la partie infra-rouge du spectre solaire ; nous indiquerons, à propos de la phosphorescence, un procédé qui a permis à Becquerel de les rendre visibles.

548. **Applications.** — La transparence de certains corps pour les radiations calorifiques lumineuses et leur opacité relative pour les radiations infra-rouges rend compte d'un certain nombre de faits intéressants.

Tel est, par exemple, le rôle de notre atmosphère pour ralentir le refroidissement des corps situés à la surface de notre globe. L'air qui nous environne contient toujours des proportions variables de vapeur d'eau ; mais on peut le regarder, même dans ces conditions, comme très transparent pour les radiations calorifiques lumineuses ; il absorbe au contraire plus ou moins les radiations obscures mais permet toujours à une bonne partie des radiations calorifiques émises par le soleil d'arriver jusqu'aux corps situés à la surface de la terre. Ces corps, ainsi échauffés par les radiations lumineuses qu'ils absorbent, rayonnent des radiations obscures peu réfringibles à cause de la faible élévation de leur température, et ces radiations sont arrêtées par la vapeur d'eau de l'atmosphère qui s'oppose ainsi au refroidissement qu'éprouveraient les corps pendant la nuit. Le refroidissement sera du reste d'autant plus ralenti que l'air sera plus humide, et les nuages se comportent à ce point de vue, ainsi que nous l'avons déjà dit (§ 540), comme de véritables écrans opaques.

Le rôle des vitres dans les serres est analogue à celui de la vapeur d'eau dans l'atmosphère. Le verre se laisse traverser par les radiations calorifiques lumineuses et les radiations obscures les plus réfringibles, mais arrête, au contraire, les radiations obscures peu réfringibles que rayonnent les objets placés à l'intérieur de la serre.

CHAPITRE III

RADIATIONS CHIMIQUES

549. **Lois géométriques de la propagation des radiations chimiques.** — Le procédé d'exploration par lequel on peut reconnaître la présence, en un point de l'espace, de radiations chimiques, consiste à exposer en ce point une feuille de papier ou une lame de verre dites *sensibles*, c'est-à-dire recouvertes d'une couche de sub-

stance susceptible d'éprouver, sous l'action de ces radiations, des modifications visibles dans sa constitution chimique.

On a pu ainsi s'assurer que les lois de la propagation des radiations chimiques sont identiques à celles de la propagation des radiations lumineuses, que des radiations chimiques accompagnent les radiations lumineuses les plus réfrangibles, mais qu'il existe des radiations chimiques invisibles plus réfrangibles que les radiations violettes extrêmes. Il résulte, en particulier, de ce dernier fait, que dans la réfraction à travers un système dioptrique, le foyer des radiations chimiques invisibles est en général différent du foyer des radiations lumineuses, conséquence importante au point de vue de la photomicrographie.

550. Intensité et nature des radiations chimiques émises par les différentes sources. — *Intensité.* — L'identité de nature des diverses espèces de radiations conduit à regarder comme applicables aux radiations chimiques les lois démontrées pour les radiations lumineuses et calorifiques.

Nous admettons donc que la loi de l'inverse du carré des distances et la loi du cosinus ou de Lambert sont applicables aux radiations chimiques, que le pouvoir émissif chimique d'une source varie suivant la direction considérée, et que ce pouvoir croît, toutes choses égales d'ailleurs, avec la température de la source, etc.

La vérification expérimentale de ces lois serait du reste difficile par suite de la difficulté que l'on éprouve, ainsi qu'on va le voir, à déterminer l'intensité d'un faisceau de radiations chimiques.

On détermine l'intensité d'un faisceau de radiations chimiques par l'intensité de l'action chimique que produit ce faisceau. Comme d'ailleurs un même faisceau produit des actions chimiques d'intensité très différentes suivant la nature du corps sur lequel il agit, il est nécessaire, dans la comparaison des intensités, de faire constamment agir les radiations sur le même composé chimique. Il faut évidemment en outre que la durée d'action des radiations soit la même dans tous les cas et que cette durée soit suffisamment courte pour que l'action chimique ne soit pas terminée.

a. — Si le composé change de couleur par suite de l'action subie, l'intensité de la coloration permettra de juger dans une certaine mesure de l'intensité des radiations, mais non d'exprimer rigoureusement cette intensité par un nombre.

b. — Lorsque l'action chimique produite entraîne la mise en liberté d'un gaz, comme c'est le cas pour la décomposition de

l'oxalate de fer, qui s'accompagne d'un dégagement de CO_2 , on peut évaluer numériquement les rapports d'intensité par le rapport des volumes de gaz mis en liberté.

c. — Certaines actions chimiques produites par les radiations donnent naissance à des courants électriques; on peut alors évaluer, par l'intensité de ces courants, l'intensité de l'action chimique et par suite celle des radiations auxquelles cette action est due. C'est sur ce principe qu'est construit l'*actinomètre* de Becquerel. L'action chimique utilisée dans cet actinomètre est la décomposition de l'iodure d'argent.

La connaissance de la valeur exacte du pouvoir émissif relatif des différentes sources pour une action chimique déterminée, et l'évaluation de ce pouvoir par un nombre, ne présentent pas d'ailleurs un grand intérêt au point de vue pratique. Il importe seulement de savoir, au point de vue de la photographie en particulier, quelles sont les sources artificielles riches en radiations chimiques. Parmi les sources les plus riches en de telles radiations, on peut citer l'arc voltaïque, le platine incandescent, le magnésium en combustion, la flamme du soufre, celle du sulfure de carbone, la lumière électrique des tubes de Geissler. A intensité lumineuse égale, la source dite *lumière Drumond* émet beaucoup moins de radiations chimiques que le magnésium en combustion; les bougies, les lampes à gaz, à huile, etc., etc., émettent également très peu de radiations chimiques.

Nature des radiations. — En recevant le spectre des diverses sources sur une substance sensible, on trouve que tous les corps émettent des radiations chimiques, pourvu qu'on les porte à une température suffisante, qu'ils émettent des radiations de plus en plus réfrangibles à mesure que leur température s'élève, que le spectre chimique des corps solides et liquides est continu aussi bien dans sa partie visible que dans sa portion invisible et que celui des gaz et des vapeurs est discontinu.

551. **Variations d'intensité et de composition que subit un faisceau de radiations chimiques pendant sa propagation.** — Quand un faisceau complexe de radiations chimiques rencontre la surface de séparation de deux milieux, ce faisceau peut subir par réflexion ou diffusion des modifications plus ou moins marquées dans son intensité ou dans sa composition. C'est par suite de l'intensité et de la nature des radiations chimiques qu'ils diffusent que des objets différents, placés dans les mêmes conditions et éclairés par la

même source, se détachent plus ou moins bien en photographie.

Les radiations chimiques qui pénètrent dans un milieu y sont absorbées après un trajet plus ou moins long, si le milieu est indéfini. Becquerel a vérifié, à l'aide de son actinomètre, que la loi de la transmission des radiations chimiques était identique à celle que nous avons indiquée à propos de la lumière; il a montré de plus que, pour une même radiation à la fois lumineuse et chimique et pour un même corps, le coefficient de transmission avait la même valeur, soit que les déterminations portassent sur l'intensité lumineuse, soit que l'on évaluât les effets chimiques.

Les diverses valeurs que peut présenter le coefficient de transmission, dans les divers corps et pour les diverses radiations chimiques, conduisent, au point de vue de la composition du faisceau transmis, à des conséquences analogues à celles que nous avons signalées pour la lumière et la chaleur. C'est ainsi, par exemple, que le quartz et le sel gemme ont sensiblement le même coefficient de transmission pour toutes les radiations chimiques visibles ou invisibles; ce coefficient de transmission est en outre très voisin de l'unité. Aussi est-ce en quartz que l'on devra fabriquer les lentilles et les prismes nécessaires à l'étude des radiations chimiques, afin que l'absorption de ces radiations soit minima. Le verre et l'eau transmettent de même assez bien, quoique à un degré déjà moindre, les diverses radiations chimiques; toutefois comme le coefficient de transmission de ces diverses substances est inférieur à l'unité, une épaisseur suffisante de l'une d'elles peut toujours éteindre complètement toutes les radiations chimiques; c'est ainsi qu'une plaque photographique, dont la face sensible est tournée vers la lumière, n'est point impressionnée si elle est placée à 60 mètres de profondeur sous l'eau.

La plupart des milieux transparents pour les diverses radiations lumineuses et par suite pour les radiations chimiques lumineuses, absorbent les radiations ultra-violettes en proportion d'autant plus grande que ces radiations sont plus réfringibles. Le bisulfate de quinine, l'esculine, le verre d'urane éteignent complètement, sous une faible épaisseur, toutes les radiations plus réfringibles que H ; de là l'emploi, proposé par Foucault, des verres d'urane comme lunettes afin de mettre à l'abri des radiations ultra-violettes les yeux des ouvriers qui ont à s'approcher des lampes électriques à arc. Certains verres rouges éteignent toutes les radiations plus réfringibles que le rouge; les radiations qu'ils transmettent ne pos-

sèdent donc aucune action chimique, mais sont cependant douées de propriétés spéciales que nous étudierons par la suite. Certains verres jaunes éteignent de même toutes les radiations plus réfrangibles que le jaune; ces verres ont l'avantage de transmettre un faisceau dont le pouvoir éclairant est assez intense, puisqu'il contient les radiations les plus lumineuses, mais dont l'action chimique est sensiblement nulle. Ce que nous venons de dire des verres rouges et des verres jaunes donne la raison de leur emploi dans les ateliers de photographie.

Au contraire, les milieux colorés en bleu ou en violet éteignent plus ou moins complètement les radiations moins réfrangibles que le bleu ou le violet et sont très transparents pour les autres. Pour une coloration et une épaisseur convenables, ces milieux sont absolument opaques pour la lumière, tandis qu'ils transmettent encore en proportion assez grande les radiations ultra-violettes.

CHAPITRE IV

EFFETS ET TRANSFORMATIONS DES RADIATIONS

352. **Généralités.** — Il résulte de ce que nous avons dit dans les Chapitres précédents que les diverses radiations simples qui constituent un faisceau complexe doivent être identiques dans leur nature. Nous préciserons d'ailleurs bientôt cette nature en montrant, par l'étude des phénomènes qui constituent l'Optique physique, que les radiations dites lumineuses sont caractérisées par des mouvements vibratoires d'une durée que nous apprendrons à déterminer et nous pourrons sûrement conclure que les radiations infra-rouges et les radiations ultra-violettes ne diffèrent des radiations lumineuses que par la durée plus ou moins grande de leurs vibrations.

En dehors de cette différence dans la durée de la vibration, on ne peut attribuer de caractères distinctifs aux diverses radiations que si on les considère, non plus en elles-mêmes, mais dans les effets qu'elles peuvent produire. La division de l'ensemble des radiations en trois catégories est donc en quelque sorte artificielle, car elle n'est basée que sur la diversité des appareils d'exploration, pile thermo-électrique, œil et plaque sensible, dont nous avons fait usage pour reconnaître l'existence de radiations à mouvements

vibratoires plus ou moins rapides, et sur la diversité des effets, élévation de température, excitation du nerf optique, réaction chimique, que l'on constate dans ces divers appareils. On conçoit d'ailleurs que les effets observés avec la pile thermo-électrique, l'œil et les corps dont on recouvre les plaques sensibles ne soient pas les seuls que les radiations plus ou moins réfrangibles puissent produire.

Tout effet produit par des radiations consiste, d'ailleurs, en vertu du principe de la conservation de l'énergie, en une transformation du mouvement vibratoire qui caractérise ces vibrations; et l'on a une confirmation expérimentale de cette application d'un principe théorique dans ce fait que, si un faisceau de radiations tombe sur un corps et y détermine un effet, d'ailleurs quelconque, certaines radiations manquent dans le faisceau transmis. Les radiations elles-mêmes sont susceptibles d'éprouver entre elles de telles transformations et de produire par conséquent des effets qui consistent dans l'émission de radiations différentes des radiations incidentes qui ont été absorbées.

Dans le présent Chapitre, nous passerons en revue les principaux effets produits par les radiations, c'est-à-dire les principales transformations des mouvements vibratoires par lesquels les radiations sont caractérisées, laissant d'ailleurs de côté l'action des radiations sur l'œil, question qui est du ressort de la Physique biologique, et la production des courants électriques, sur laquelle nous reviendrons dans le Livre de l'Électricité.

553. Effets calorifiques des radiations. — Nous savons déjà que l'absorption des radiations à mouvements vibratoires relativement lents élève la température du corps absorbant. Cette élévation de température peut d'ailleurs produire, suivant qu'elle est plus ou moins grande, les divers phénomènes déjà étudiés en Chaleur; elle est d'autre part capable, lorsqu'elle se produit dans certaines conditions et sur certains corps, de donner naissance à un courant électrique que nous avons précédemment utilisé.

L'élévation de température d'un corps placé sur le trajet d'un faisceau de radiations étant dû aux radiations absorbées, on conçoit que, toutes choses égales d'ailleurs, cette élévation de température sera d'autant plus grande ou d'autant plus rapide que le pouvoir absorbant du corps considéré sera lui-même plus grand.

C'est ainsi que deux étoffes identiques, l'une blanche et l'autre noire, exposées pendant le même temps aux rayons solaires, attei-

gnent des températures bien différentes, l'étoffe noire dont le pouvoir absorbant est plus considérable atteignant la température la plus élevée. De là l'emploi des étoffes claires pour se mettre à l'abri des chaleurs de l'été, des étoffes de couleur sombre en hiver.

La considération du pouvoir absorbant montre encore qu'il y a avantage, lorsqu'on veut échauffer un corps, à le recouvrir d'une substance ou à le placer dans une enveloppe dont le pouvoir absorbant soit considérable. La couche de noir de fumée dont on recouvre la face de la pile thermo-électrique tournée vers la source a donc pour effet de rendre plus considérable l'élévation de température de cette face.

Ajoutons que les radiations solaires absorbées par l'atmosphère terrestre élèvent la température de l'air. La quantité de chaleur solaire ainsi absorbée par notre atmosphère est d'ailleurs assez considérable. D'après Crova, en effet, on peut évaluer à trois calories-gramme-degré, la quantité de chaleur que reçoit normalement en une minute une surface d'un centimètre carré placée à la limite de notre atmosphère, tandis que cette même surface, placée au niveau du sol à Montpellier, ne reçoit plus, dans les mêmes conditions, et d'après le même auteur, que deux calories-gramme-degré au maximum. Nous savons d'autre part que la quantité de chaleur absorbée est d'autant plus grande que l'air est plus humide; on conçoit d'après cela que, au niveau des hautes montagnes, les couches d'air, généralement beaucoup plus sèches que les couches moins élevées, soient beaucoup plus froides que celles-ci, quoique l'intensité calorifique des radiations solaires qui y arrivent soit plus considérable.

334. **Actions chimiques des radiations.** — Les actions chimiques provoquées par les radiations sont nombreuses et très diverses; elles consistent tantôt en des changements d'état allotropique, tantôt en des combinaisons, tantôt en des décompositions, tantôt en des actions spéciales de nature encore inconnue. Nous passerons successivement en revue les principaux de ces divers effets.

a. — Comme transformations allotropiques, nous citerons celles du phosphore et du soufre. Il suffit d'exposer au soleil un bâton de phosphore ordinaire incolore, préalablement enfermé dans un tube de verre contenant un gaz inerte, pour qu'il se transforme lentement, à sa surface, en phosphore amorphe rouge; d'autre part, une solution de soufre dans le sulfure de carbone laisse déposer, quand on la conserve à la lumière, des flocons de soufre insoluble. Ces

modifications du soufre et du phosphore ne se produisent point si le tube ou la solution sont maintenus dans l'obscurité.

b. — Parmi les combinaisons dues aux radiations, l'une des plus fréquemment citées est celle du chlore et de l'hydrogène. Ces deux gaz, qui sont sans action l'un sur l'autre dans l'obscurité, se combinent lentement à la lumière diffuse et avec explosion sous l'action directe des rayons solaires. Le brome se comporte comme le chlore, mais la réaction est moins vive.

Beaucoup de substances organiques qui ne se combinent pas directement avec l'oxygène de l'air dans l'obscurité, s'oxydent à l'air sous l'influence des radiations solaires. Tel est le cas d'un grand nombre de résines, d'essences, de matières colorantes; l'oxydation de ces substances modifie d'ailleurs leurs propriétés physiques ou chimiques. Le bitume de Judée, par exemple, qui est soluble dans les essences, devient insoluble après exposition à la lumière, et c'est sur cette propriété que s'était fondé Nicéphore Niepce pour obtenir les premières photogravures. La résine de gayac bleuit, en absorbant l'oxygène, sous l'action des radiations. Bon nombre de matières colorantes se décolorent au contraire en s'oxydant dans les mêmes conditions, ce qui justifie l'exposition à l'air et au soleil des tissus que l'on veut blanchir.

c. — La réduction des sels d'argent par la lumière est l'un des exemples de décomposition les plus intéressants, à cause de ses applications à la photographie. Le chlorure d'argent, qui est blanc, noircit rapidement à la lumière, par décomposition, et la réduction est plus ou moins complète suivant la durée d'action et l'intensité des radiations. Le bromure, l'iodure, le cyanure, l'azotate, etc., d'argent subissent, sous l'action des radiations, des modifications analogues; il en est de même, à des degrés divers, pour les composés correspondants du mercure, du fer, du platine, de l'or, etc. Un grand nombre de composés oxygénés, acide chromique, bichromate de potasse, azotate d'urane, etc., sont réduits dans les mêmes conditions.

d. — Les radiations déterminant d'une part la combinaison de certains composés avec l'oxygène, le chlore, le brome, etc., et provoquant d'autre part la décomposition de certaines combinaisons avec mise en liberté d'oxygène, de chlore, de brome, etc., on conçoit que l'on augmente l'intensité ou la rapidité de l'action des radiations en faisant agir celles-ci sur un mélange de deux substances appartenant aux deux catégories précédentes. C'est ce qui arrive

lorsqu'on mélange des composés métalliques tels que des azotates, des chlorures,.... d'argent, etc., à des matières organiques, du papier par exemple; l'oxygène, le chlore... du composé, mis en liberté par l'action de la lumière, peut alors se fixer sur la matière organique ou se combiner à son hydrogène. C'est sur ce principe qu'est fondée la préparation des papiers sensibles utilisés en photographie.

e. — Les diverses actions que nous venons de passer en revue exigent en général un temps assez long pour se produire. Par contre un grand nombre de substances, dites *impressionnables* par la lumière, subissent, lorsqu'on les expose aux radiations pendant un temps très court, des modifications spéciales, qui ne sont pas il est vrai directement perceptibles, mais qui sont rendues très nettement manifestes si l'on fait agir sur ces substances certains agents chimiques, auxquels on a, en raison de leur rôle, donné le nom de *révélateurs*. Du papier qui a été *insolé*, c'est-à-dire exposé au soleil, paraît n'avoir subi aucune altération; il jouit pourtant alors de la propriété de réduire les sels d'argent, car il noircit si on le plonge, dans l'obscurité, au sein d'une solution de ces sels, tandis que du papier non exposé à la lumière reste blanc dans les mêmes conditions. Les sels d'argent jouent ici le rôle d'agent révélateur. Du papier imprégné d'iodure d'argent et insolé pendant un temps très court ne présente aucune modification apparente; il a pourtant été modifié, car il suffit de le plonger dans une solution de sulfate de fer, ou d'acide gallique pour le voir noircir rapidement. Le nombre des substances impressionnables est très considérable; les matières organiques qui ne sont pas noires, l'albumine, le collodion, l'amidon, etc., présentent en général une assez grande impressionnabilité. Les sels d'argent, chlorure, bromure, iodure, azotate, le chlorure d'or, l'azotate d'urane, l'acide gallique, etc., sont également impressionnables. Chaque substance impressionnable exige d'ailleurs des agents révélateurs spéciaux; mais, en général, si une substance impressionnable A a pour agent révélateur la substance B, la substance A pourra jouer à son tour le rôle d'agent révélateur vis-à-vis de la substance B utilisée comme corps impressionnable.

Les modifications que subissent les substances impressionnables par une courte exposition à la lumière, sont encore inconnues. S'agit-il d'une action chimique ou d'une action physique et de quel genre est cette action? On en est encore réduit, à ces divers points

de vue, à des hypothèses dans le détail desquelles nous n'entrerons pas, nous bornant à signaler, en outre des phénomènes dont il a été parlé, quelques autres faits intéressants.

Une feuille de papier sensible noircit, dans l'obscurité, si on la place à une faible distance (5 à 10 millimètres) d'une feuille de papier insolé; l'interposition d'une lame de verre ou de mica empêche le phénomène. Une substance impressionnable primitivement insolée et portée ensuite dans l'obscurité, garde, pendant un temps souvent fort long, la propriété d'être modifiée par ses agents révélateurs. L'action produite par la lumière peut donc se transmettre à distance à travers l'air, et se conserver un temps plus ou moins long; cette action est en outre activée par la chaleur.

f. — La nature des radiations capables de provoquer les diverses actions chimiques varie avec les substances sur lesquelles les radiations doivent agir. La combinaison du chlore et de l'hydrogène peut être déterminée par les diverses radiations du spectre comprises entre le jaune et l'extrême ultra-violet; le papier à l'iodure d'argent est sensiblement modifié par les mêmes radiations; le papier ou le collodion au bromure d'argent est sensible aux diverses radiations, depuis l'infra-rouge (raie A dans le rouge), ou depuis la raie D dans le jaune, suivant la façon dont il a été obtenu, jusqu'à l'extrême ultra-violet. L'action des radiations sur le papier au chlorure d'argent s'étend de F jusqu'aux limites de l'ultra-violet; il en est de même pour la plupart des substances impressionnables. Ce sont donc surtout les rayons bleus, violets et ultra-violet qui sont actifs; aussi les a-t-on appelés *excitateurs*.

Les radiations les moins réfrangibles, qui sont généralement impuissantes à produire les actions chimiques que déterminent les rayons plus réfrangibles, peuvent, dans certains cas, provoquer des actions semblables ou des actions antagonistes. Becquerel a découvert en effet que les rayons rouges et infra-rouges, qui n'impressionnent point le papier au chlorure ou à l'iodure d'argent ainsi que certains papiers au bromure d'argent, produisent sur ces papiers, après qu'ils ont été exposés pendant un temps très court aux radiations très réfrangibles, la même action que ces radiations; ils continuent l'action commencée par les radiations très réfrangibles, ce qui leur a fait donner le nom de *rayons continuateurs*.

Un papier blanc imprégné de résine de gayac, sur lequel on

reçoit un spectre très brillant, bleuit seulement dans le violet, et l'ultra-violet. Mais, si le papier a été préalablement bleui soit par exposition à la lumière, soit par l'action du chlore, il redevient blanc, excepté dans la région correspondant au bleu et au violet, lorsqu'on reçoit sur lui le spectre solaire, et c'est au niveau des radiations rouges qu'il blanchit le plus rapidement; les rayons peu réfrangibles provoquent donc des réductions là où les rayons très réfrangibles déterminent des oxydations. Ces actions antagonistes ont pu d'ailleurs être observées sur d'autres substances impressionnables.

555. **Photographie.** — La photographie, qui consiste dans la reproduction directe des images des objets, est, sans contredit, la plus intéressante application, au point de vue pratique, des actions chimiques de la lumière. C'est Nicéphore Niepce qui indiqua le premier, en 1826, le moyen de reproduire des gravures par l'action de la lumière; Daguerre imagina quelques années plus tard un procédé photographique, appelé depuis *daguerréotypie*, qui donnait déjà des résultats satisfaisants, mais qui ne possède plus aujourd'hui qu'un intérêt historique; vers la même époque, Talbot indiquait une méthode qui est encore usitée de nos jours, non sans avoir reçu toutefois de grands perfectionnements. Les procédés photographiques actuellement employés sont fort nombreux; quoique présentant des différences importantes, ils reposent pourtant sur les mêmes principes; ce sont ces principes généraux que nous nous bornerons à exposer ici, tout en décrivant l'un des procédés le plus usités.

a. — Une substance impressionnable, du gélatino-bromure d'argent par exemple, est étalée sur une lame de verre ou *plaque sensible*, que l'on dispose au fond d'une *chambre noire*, là où vient se dessiner nettement l'image réelle des objets extérieurs. La chambre noire, représentée en coupe sur la figure 339, est elle-même constituée par une boîte rectangulaire dont la face antérieure M' est percée d'une ouverture munie d'une lentille ou plutôt d'un système LL' de lentilles convergentes (*objectif*) (1), et dont la paroi

(1) Un bon objectif doit être dépourvu d'aberrations de sphéricité (*aplanétisme*) et son foyer chimique doit coïncider avec son foyer lumineux (*achromatisme*); les images qu'il donne ne doivent pas, en outre, présenter de *distorsion*, c'est-à-dire qu'elles ne doivent pas être déformées sur les bords; enfin tous les points de l'image doivent être nets dans un même plan (*champ plat*). On réalise ces diverses conditions par l'asso-

postérieure est constituée par une lame de verre dépoli V sur laquelle on fait d'abord former l'image nette des objets extérieurs et à laquelle on substitue ensuite la plaque sensible. Les autres parois de la chambre, absolument opaques, sont généralement à soufflet, ce

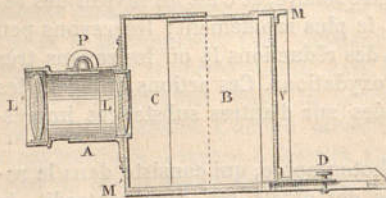


Fig. 339. — Coupe de la chambre noire.

qui permet de mettre exactement au point, pour diverses distances de l'objet visé, en déplaçant la lame de verre dépoli ; toutefois la mise au point peut aussi s'effectuer par le déplacement de l'objectif.

Des dispositions spéciales permettent de substituer à la lame de verre dépoli la plaque sensible, sans que celle-ci reçoive la moindre radiation.

Cette substitution effectuée, on découvre, à l'intérieur de la chambre noire, la plaque sensible et l'on ouvre pendant un temps variable suivant les circonstances (*pose*), mais toujours très court, l'objectif que l'on a préalablement fermé au moyen d'un *obturateur*. Les différents points de la plaque sensible sont alors impressionnés pendant la pose et l'action en chaque point est plus ou moins énergique, suivant que ce point reçoit plus ou moins de radiations, c'est-à-dire suivant que le point correspondant de l'objet est plus ou moins éclairé.

b. — Lorsque la plaque a été ainsi impressionnée, on la porte dans une pièce obscure, ou plutôt dans une pièce qui n'est éclairée que par la lumière transmise à travers un verre rouge (§ 551), et on la place dans une solution contenant un agent révélateur approprié. Dans le cas du gélatino-bromure, on emploie surtout comme révélateur l'une des solutions suivantes.

1° Dans 3 parties en volume de la solution :

Eau distillée.....	1000
Oxalate neutre de potassium.....	300,

on verse, peu avant l'immersion de la plaque, 1 partie en volume de la solution :

ciation de lentilles appropriées et l'emploi de diaphragmes convenablement placés.

Eau distillée.....	1000
Sulfate de protoxyde de fer.....	300
Acide sulfurique.....	III gouttes.

2° On mélange, dans l'ordre suivant :

- 2^{co} d'une solution contenant 1 partie de bromure de potassium pour 10 d'eau.
- 4^{co} d'une solution contenant 1 partie d'acide pyrogallique pour 10 d'alcool.
- 250^{co} d'eau.
- X gouttes d'ammoniaque.

On trouve d'ailleurs dans le commerce des révélateurs tout préparés, d'un usage fort commode et donnant des résultats très satisfaisants.

Sous l'influence du révélateur, les modifications, en quelque sorte latentes, subies par la plaque sensible deviennent manifestes, l'image latente se *développe*; la plaque au gélatino-bromure noircit en effet, par suite de la réduction du sel d'argent, dans tous les points qui ont été impressionnés par la lumière et la teinte noire est en chaque point d'autant plus intense que l'impression y a été elle-même plus énergique, c'est-à-dire que le point correspondant de l'objet était plus éclairé. Les parties non éclairées de l'objet seront dès lors représentées par des régions qui ont conservé leur aspect blanchâtre primitif dû au bromure d'argent non impressionné, et les parties éclairées, par des régions d'aspect noirâtre dû au bromure d'argent décomposé; l'image ou *épreuve* ainsi obtenue est dite *inverse* ou *negative*.

c. — Si l'on exposait à la lumière la plaque ainsi développée, les parties non impressionnées encore le seraient alors, et l'image disparaîtrait bientôt. Aussi est-il nécessaire de *fixer* l'image en enlevant, avant de porter la plaque au jour, toutes les parties non impressionnées encore. Il suffit pour cela de porter la plaque, après l'avoir lavée à l'eau distillée, dans une solution d'hypo-sulfite de soude à 20 p. 100 où on la laisse séjourner jusqu'à ce que, par suite de la dissolution du bromure non décomposé, les régions blanchâtres, où n'existe plus alors que de la gélatine pure, soient devenues absolument transparentes; la plaque est ensuite lavée à l'eau pendant plusieurs heures. Cette plaque, après qu'elle a été ainsi traitée puis séchée à l'ombre, constitue un *cliché*; elle est désormais inaltérable et permet d'obtenir une série indéfinie d'images de l'objet qu'elle représente.

d. — Pour obtenir ces images on place derrière la plaque, directement contre la couche de gélatine, la face sensible d'un papier salé albuminé par exemple, sensibilisé par son immersion dans un bain au nitrate d'argent. L'autre face du papier est protégée, par un écran opaque qui, grâce au dispositif spécial appelé *châssis-presse*, permet de maintenir le papier exactement appliqué contre la plaque et d'éviter tout glissement. Si l'on expose alors le papier recouvert de la plaque à la lumière diffuse du soleil, celle-ci ne peut arriver sur le papier qu'après avoir été tamisée en quelque sorte par l'image négative, si bien que la réduction des sels d'argent dans les divers points du papier sera plus ou moins complète, suivant que les points du cliché qui recouvrent ces divers points sont plus ou moins transparents. Le papier devient donc noir dans les parties qui correspondent aux blancs de l'image négative, c'est-à-dire aux régions sombres de l'objet, et reste blanc dans celles qui correspondent aux noirs de l'épreuve négative, c'est-à-dire aux régions éclairées de l'objet.

Les parties plus ou moins blanches de cette image sur papier correspondront donc aux parties plus ou moins éclairées de l'objet; aussi cette image est-elle dite *positive*.

L'exposition du papier à la lumière doit être de plus longue durée que celle de la plaque sensible.

On peut ainsi obtenir successivement un nombre indéfini d'épreuves positives.

e. — Mais ces épreuves s'altéreraient à la lumière et deviendraient uniformément noires si on ne les fixait pas en dissolvant les sels non décomposés ou incomplètement décomposés dans les régions claires de l'image.

Toutefois, lorsqu'on se sert de papiers imprégnés de sels d'argent, il est nécessaire, si l'on veut éviter que l'image ne s'altère après le fixage, sous l'influence des agents oxydants et sulfurants de l'atmosphère, de faire subir à l'épreuve positive une opération préalable qui consiste à plonger cette épreuve, après l'avoir lavée, dans l'une des solutions suivantes :

1° Eau distillée.....	2 litres.
Chlorure d'or.....	1 gramme.
Acétate de soude (fondu ou cristallisé)...	30 grammes.
2° Eau distillée.....	2 litres.
Chlorure d'or.....	1 gramme.
Borax fondu en poudre.....	8 grammes.

Par immersion dans l'un de ces bains, l'épreuve subit des changements de teinte qui ont fait donner à cette opération le nom de *virage*.

Le moment où il faut retirer l'épreuve du bain de virage s'apprécie d'après la teinte de l'image. Le temps nécessaire pour obtenir une même teinte varie, en effet, avec une foule de conditions, température du bain, composition, épaisseur du papier, etc., etc.

f. — Dès que l'épreuve est virée, on la plonge dans l'eau et on la porte dans une solution d'hyposulfite de soude à 20 p. 100 qui dissout toutes les parties encore impressionnables et qui, par conséquent, fixe l'image. L'épreuve doit rester de dix à quinze minutes dans ce bain ; on la lave ensuite à grande eau pendant huit à dix heures, et il ne reste plus alors qu'à la suspendre pour la faire sécher.

556. **Remarques et applications.** — Les images obtenues par les procédés que nous venons d'indiquer ne reproduisent pas les couleurs des objets. De nombreuses tentatives ont été effectuées pour obtenir des photographies colorées. Becquerel, Niepce, Moitessier, etc., sont arrivés dans cette voie à d'importants résultats, mais les épreuves colorées obtenues n'ont pu être fixées et s'altèrent plus ou moins rapidement à la lumière. Tout récemment Lippmann a indiqué, pour reproduire par photographie les couleurs des objets, un procédé qui diffère entièrement, dans son principe, de ceux des auteurs que nous venons de citer ; nous devons en renvoyer l'exposé à l'optique physique.

Les applications de la photographie sont très nombreuses. On en fait un fréquent usage en Astronomie, où on l'emploie actuellement pour dresser la carte du ciel ; Flammarion a montré qu'on pouvait l'utiliser pour la détermination exacte de la position du pôle, et Laussedat s'en est servi, en Géodésie, pour la levée des plans. La photographie rend également de grands services en Micrographie, en permettant de reproduire l'image réelle fournie par l'objectif d'un microscope.

Une foule d'appareils usités en Météorologie enregistrent photographiquement divers phénomènes atmosphériques (pression barométrique, état électrique de l'atmosphère, etc.). A cet effet, l'instrument renvoie sur une feuille de papier sensible un rayon lumineux réfléchi par un miroir dont la direction varie avec l'intensité du phénomène à mesurer ; ce rayon réfléchi reste toujours dans un même plan perpendiculaire à celui dans lequel un mou-

vement d'horlogerie entraîne le papier sensible et marque ainsi sur ce papier la courbe qui représente la loi du phénomène.

La faible durée de pose qu'exige une plaque pour être impressionnée (cette durée peut être réduite à $\frac{1}{2000}$ de seconde) permet

d'obtenir une image nette d'objets en mouvements; le déplacement qu'éprouve l'objet, pendant le temps excessivement court durant lequel l'objectif reste découvert, n'est pas en effet suffisant pour que la netteté de l'image soit sensiblement altérée. Les photographies obtenues dans ces conditions sont dites *instantanées*. Marey a très heureusement appliqué la photographie instantanée à l'étude des corps en mouvement, et a imaginé à cet effet des appareils d'une extrême ingéniosité; grâce à la méthode d'observation ainsi créée, et qui porte le nom de *chronophotographie*, Marey a pu, en particulier, analyser les mouvements si complexes de la marche de l'homme, ceux du vol des oiseaux, etc., etc.

537. Actions des radiations sur les êtres vivants. — L'étude de ces actions est du domaine de la Physique biologique, aussi serons-nous bref à ce sujet.

Sous l'action des radiations, et principalement des radiations les plus réfrangibles, les parties vertes des végétaux absorbent l'acide carbonique de l'air, fixent le carbone et rejettent l'oxygène; ces phénomènes ne se produisent point dans l'obscurité.

La production de la chlorophylle est également liée à l'action des radiations; les plantes qui poussent dans l'obscurité ou dans des endroits peu éclairés sont blanches en effet et non vertes, ce qui justifie la pratique qui consiste à recouvrir de terre certains légumes (salades, asperges, etc.), pour empêcher leur coloration.

Les radiations favorisent aussi le développement de bon nombre d'animaux. Un grand nombre d'infusoires ne peuvent se développer que sous leur action (Morren); les œufs de grenouilles n'éclosent point dans l'obscurité et les têtards n'y subissent point leurs métamorphoses (Edwards).

La plupart des microbes ne résistent pas à l'action directe de la lumière, et l'on peut dire que les radiations sont l'un des facteurs essentiels de la désinfection.

La désinfection spontanée des eaux de rivière a pour principale origine la lumière solaire. Le bacille typhique est tué par cinq ou six heures d'insolation (Janowski); d'autres sont détruits beaucoup plus rapidement. Marshall Ward a ingénieusement mis en évidence

les propriétés bactéricides de la lumière par l'obtention de véritables photographies dans lesquelles les microbes jouent le rôle de corps sensible à la lumière. A cet effet, on fait former sur une plaque de gélatine semée de microbes et placée ensuite dans la chambre noire d'un appareil photographique l'image d'un objet extérieur; les microbes pullulent et obscurcissent la gélatine aux points qui correspondent aux parties les moins éclairées de l'objet, tandis qu'ils ne peuvent se développer dans les régions plus éclairées de l'image où la gélatine reste transparente. On fixe en exposant toute la plaque à la lumière de façon à tuer toutes les bactéries existantes et à s'opposer ainsi à leur développement ultérieur.

Les radiations agissent encore sur la coloration des téguments des animaux. Ce sont les animaux des pays chauds qui présentent les couleurs les plus vives. Les hommes qui s'exposent journellement dans les champs aux actions des rayons solaires, sont plus colorés que ceux qui vivent dans des habitations ou dans les mines.

Enfin les radiations, lorsque leur intensité est suffisante, peuvent causer dans certaines circonstances des lésions diverses sur lesquelles nous ne saurions insister ici.

La façon dont agissent les radiations pour provoquer les divers phénomènes que nous venons de signaler ne nous est d'ailleurs point connue encore.

558. Transformations des radiations. — Nous avons déjà cité des exemples de transformations de radiations lumineuses en radiations calorifiques obscures; faisons encore remarquer qu'un faisceau de radiations solaires débarrassé, par son passage à travers une épaisseur convenable d'alun, de ses radiations obscures les plus réfrangibles, élève la température d'un corps placé sur son trajet et que ce corps échauffé émet à son tour des radiations obscures d'autant moins réfrangibles que sa température est moins élevée.

Inversement, une lame de platine placée au foyer obscur du ballon de Tyndall (§ 547, *d*) est portée à l'incandescence et émet alors des radiations lumineuses plus réfrangibles que les radiations obscures qui leur ont donné naissance.

Ces transformations de radiations calorifiques obscures en radiations lumineuses, et *vice-versa*, ne sont d'ailleurs pas les seules que l'on puisse observer; certaines substances sont capables de

transformer les radiations ultra-violettes ou lumineuses qu'elles absorbent en radiations lumineuses moins réfrangibles; tantôt ces substances restent plus ou moins longtemps lumineuses après qu'on a cessé de les exposer aux radiations qu'elles transforment et l'on dit qu'elles sont *phosphorescentes*; tantôt au contraire l'émission de lumière se produit seulement pendant que le corps reçoit les radiations qu'il est capable de transformer; on dit dans ce cas que le corps est *fluorescent*. Nous étudierons successivement ces deux phénomènes.

559. **Phosphorescence** ⁽¹⁾. — *Modes d'observation*. — Lorsque la durée de la phosphorescence d'un corps est assez grande, on peut étudier le phénomène en exposant pendant un certain temps le corps à la lumière et le plaçant ensuite dans l'obscurité; un assez grand nombre de corps, en particulier les sulfures des métaux terreux ⁽²⁾, émettent ainsi de la lumière par phosphorescence pendant un temps suffisant pour que l'on puisse utiliser ce mode d'observation. Mais, pour beaucoup de substances, la durée d'émission de la lumière est très courte et il faut alors, pour observer leur phosphorescence, avoir recours à un instrument imaginé par Edmond Becquerel et connu sous le nom de *phosphroscope*. Cet instrument, qui permet d'examiner les corps très peu de temps après le moment où ils ont été exposés à l'action directe des radiations, est constitué par deux disques opaques parallèles A et B fixés à une petite distance sur un même axe et enfermés dans une caisse métallique percée de deux fenêtres en regard A' et B'. Chacun des dis-

(1) On désigne en général sous le nom de *phosphorescence* la propriété que possèdent certains corps d'émettre de la lumière dans l'obscurité, à une température bien inférieure à celle de l'incandescence. Les phénomènes de phosphorescence peuvent être provoqués par des actions de natures bien différentes, les unes d'ordre chimique, les autres d'ordre physique; à la première catégorie appartiennent la phosphorescence du phosphore, qui est due à une combustion lente, la phosphorescence des animaux lumineux, celle qui se produit lors de la putréfaction de certains animaux ou végétaux, etc., tous phénomènes qui ne peuvent s'observer dans un milieu privé d'oxygène. Ces divers modes de phosphorescence sont pour la plupart fort mal connus, ils n'ont du reste pas de rapport direct avec le point de vue qui nous intéresse, aussi les laissons-nous ici entièrement de côté pour nous occuper seulement de la phosphorescence provoquée par les radiations.

(2) C'est à du sulfure de calcium que le *phosphore de Bologne* doit ses propriétés phosphorescentes; le *phosphore de Canton* doit ces mêmes propriétés à du sulfure de baryum.

ques est muni de quatre ouvertures, et les ouvertures de l'un correspondent aux parties pleines de l'autre, si bien que la lumière qui pénètre par l'une des fenêtres de la boîte ne peut se propager directement jusqu'à l'autre fenêtre, quelle que soit du reste la vitesse de rotation des disques. Le corps à examiner est placé entre les deux disques sur la ligne passant par les deux fenêtres de la boîte; ce corps est donc, lorsqu'on fait tourner les disques, exposé aux radiations qui tombent sur l'une des fenêtres A' pendant toute la durée du passage de chacune des ouvertures du disque A devant cette fenêtre; par contre, le corps est, pendant tout ce temps, invisible pour un observateur placé dans l'obscurité, en face de la fenêtre B' et ne peut être aperçu que lorsque l'une des ouvertures du disque B vient passer devant la fenêtre B'. On voit que, grâce à cette disposition, le corps apparaît d'autant plus vite, après le moment où il a été insolé, que la vitesse de rotation imprimée aux disques est plus grande. La durée de chaque insolation diminue d'ailleurs à mesure que cette vitesse croît, mais le nombre des insolutions par seconde variant en sens inverse, le temps pendant lequel le corps est insolé, dans l'intervalle d'une seconde par exemple, est invariable. Un système d'engrenages permet du reste d'imprimer aux disques telle vitesse de rotation que l'on désire.

Lois des phénomènes. — On appelle radiations *inductrices* celles que l'on fait agir sur un corps pour produire sa phosphorescence et radiations *induites* celles que le corps émet. Il est évident, d'ailleurs, que l'émission de ces radiations induites ne se produit pas seulement dans l'obscurité, mais aussi pendant la durée de l'insolation.

Les radiations inductrices qui provoquent surtout la phosphorescence sont les radiations très réfrangibles, bleu, violet et ultraviolet. En recevant des spectres continus sur des lames de verre recouvertes de différentes substances phosphorescentes, on constate que le maximum d'action ne se trouve pas, pour les diverses substances, dans la même région du spectre.

Les radiations peu réfrangibles, radiations rouges et calorifiques, sont incapables d'exciter la phosphorescence; elles paraissent même douées d'une action antagoniste de celle des radiations plus réfrangibles. Si l'on expose, en effet, aux radiations rouges et infra-rouges une plaque phosphorescente primitivement insolée et émettant par suite de la lumière induite, cette lumière paraît d'abord plus intense, mais elle s'affaiblit bientôt et s'éteint plus vite que si la plaque était restée dans l'obscurité. Les radiations peu réfrangibles

activent donc la phosphorescence et font émettre aux corps toute la lumière qu'ils sont capables d'émettre en un temps moindre que celui durant lequel ils resteraient lumineux dans l'obscurité.

Si l'on reçoit sur une plaque phosphorescente insolée un spectre solaire bien pur, la phosphorescence est activée, puis supprimée en tous les points où arrivent des radiations calorifiques; elle persiste au contraire au niveau des bandes froides, d'où un procédé imaginé par Becquerel pour rendre ces bandes visibles.

L'élévation de température a une action analogue à celle des radiations peu réfrangibles; elle active la phosphorescence et il suffit parfois de chauffer un corps phosphorescent, primitivement insolé mais qui paraît ne plus émettre de lumière, pour le rendre de nouveau lumineux pendant quelques instants. On peut admettre que l'on fait ainsi émettre très rapidement au corps une quantité de lumière qui, émise lentement, n'était pas suffisante pour impressionner notre rétine.

Lorsque l'émission de lumière provoquée par la chaleur est terminée, le corps ne peut redevenir phosphorescent qu'après une nouvelle insolation.

Le mode d'action d'une élévation de température ne paraît cependant pas identique à celui des radiations peu réfrangibles; ces radiations agissent, en effet, même lorsqu'on refroidit les corps phosphorescents et leur action ne peut donc être attribuée à l'élévation de température qu'elles produisent sur ces corps.

La lumière blanche agit simultanément et en quelque sorte en sens inverses par les deux groupes de rayons dont nous venons d'étudier l'action. Les radiations peu réfrangibles activant l'émission de la lumière pendant l'insolation même, l'intensité de la lumière émise dans l'obscurité et la durée de l'émission sont affaiblies par cela même; on conçoit dès lors que l'activité phosphorogénique d'une lumière blanche complexe soit augmentée si l'on tamise cette lumière en la faisant passer à travers un verre bleu qui arrête toutes les radiations peu réfrangibles.

En conséquence, les sources lumineuses les plus propres à exciter la phosphorescence sont les sources riches en radiations violettes et ultra-violettes (§550). La flamme des bougies, celle du gaz, etc., qui émettent très peu de ces radiations et qui sont très riches en radiations calorifiques, ont une action phosphorogénique très faible.

La couleur de la lumière induite dépend de la nature du composé

et parfois aussi des radiations inductrices ; elle peut varier du violet au rouge. Une radiation simple ne se transforme pas, par phosphorescence, en une autre radiation simple, mais en un ensemble de radiations formant, tantôt un spectre continu, tantôt un spectre sillonné de bandes noires.

La réfrangibilité des radiations induites est toujours moindre que celle de la radiation inductrice ; de là un procédé pour rendre visible le spectre ultra-violet : il suffit de recevoir ce spectre sur une substance phosphorescente ; les radiations ultra-violettes sont transformées en radiations moins réfrangibles capables d'exciter notre rétine.

La durée de la phosphorescence est très variable d'un composé à l'autre. Les sulfures de calcium et de strontium, sont encore visibles dans l'obscurité trente heures après leur insolation ; au bout de huit jours on peut encore les rendre lumineux en les chauffant (Becquerel). En outre des sulfures des métaux terreux, on peut citer, parmi les corps dont la phosphorescence a une assez longue durée, le diamant et la chlorophane, mais ce sont là des exceptions ; la phosphorescence est en général courte et ne peut être observée que grâce à l'emploi du phosphoroscope. Le nombre des corps que Becquerel a ainsi trouvés phosphorescents est tel qu'il est permis de supposer que la phosphorescence est une propriété très générale et que les composés ne s'illuminant pas dans le phosphoroscope ont simplement une phosphorescence trop courte ou trop faible pour qu'elle puisse être révélée par ce mode d'observation, qui a cependant permis d'examiner les corps 0^s.0001 après l'insolation.

La durée d'émission de lumière par un corps phosphorescent n'étant pas la même pour les diverses radiations qui constituent la lumière induite, on conçoit que la composition de cette lumière, et par suite la couleur du corps, changent à mesure que le temps s'écoule. Une élévation de température modifie aussi parfois la nuance de la lumière induite. C'est ainsi que le sulfure de strontium passe du violet à l'orangé, en présentant toutes les couleurs spectrales intermédiaires, quand on le chauffe de -20° à $+200^{\circ}$. Dans des conditions analogues, le sulfure de calcium passe au contraire du vert au violet.

560. **Fluorescence.** — Un grand nombre de corps transparents, placés dans une chambre obscure sur le trajet d'un faisceau de rayons solaires, paraissent comme imprégnés d'une substance opaline qui diffuse de la lumière dans tous les sens ; c'est à ce phéno-

mène, observé pour la première fois sur certains échantillons de *spath fluor*, que l'on a donné le nom de *fluorescence*.

Nous citerons parmi les substances minérales capables de devenir fluorescentes, dans les conditions que nous venons d'indiquer, les platino-cyanures métalliques, les sels d'uranium, le verre coloré avec ce métal, etc., etc.; mais c'est surtout parmi les matières organiques que l'on trouve des composés fluorescents. Les solutions d'écorce de marronnier d'Inde dans l'eau (esculine), celles de sulfate de quinine, de chlorophylle, etc., etc., sont fluorescentes à un haut degré; la peau, la corne, les os, la rétine et les divers milieux transparents de l'œil (humeur aqueuse, cristallin et humeur vitrée) sont également fluorescents, mais à un degré moindre.

Les radiations capables de provoquer la fluorescence sont en général les radiations les plus réfringibles, bleues, violettes et ultra-violettes.

Le degré d'activité d'une radiation déterminée dépend, d'ailleurs, de la nature du corps sur lequel on la fait agir et les seules radiations actives sont celles qui peuvent être absorbées (Stockes). En conséquence, si l'on reçoit un spectre complet sur des solutions étendues d'esculine ou de bisulfate de quinine qui absorbent les radiations de F en T, la fluorescence n'apparaîtra que dans la région du spectre comprise entre F et T; de même le spectre d'absorption d'une solution alcoolique de chlorophylle présentant cinq bandes noires, deux dans le rouge, une au milieu du jaune, une autre dans le vert et une dernière qui s'étend du bleu jusqu'en T dans l'ultra-violet, c'est au niveau des radiations correspondant à ces cinq bandes que la solution de chlorophylle se montre fluorescente lorsqu'on l'éclaire par un spectre solaire.

La fluorescence s'observe surtout à la surface des corps, elle s'éteint rapidement à une petite profondeur; si l'on place à la suite l'une de l'autre, sur le trajet d'un même faisceau lumineux, deux cuves contenant un même liquide fluorescent, seul le liquide de la première s'illuminera dans une partie de son épaisseur, celui de la seconde ne présentera de fluorescence que si on enlève la première cuve. Les considérations précédentes rendent compte de ces phénomènes; les radiations actives étant précisément les radiations absorbées, on comprend qu'un faisceau de radiations ne contienne plus, après avoir traversé une épaisseur suffisante d'un corps, les radiations capables d'exciter la fluorescence de ce même corps.

La composition de la lumière induite dépend de la nature du corps et parfois aussi des radiations inductrices ; mais la réfrangibilité des radiations induites est toujours moindre que celle des radiations inductrices.

La fluorescence ne paraît différer de la phosphorescence qu'en ce que la lumière induite est émise seulement pendant la durée d'action de la lumière inductrice. Mais la valeur de cette différence s'est notablement réduite depuis que l'on sait, grâce à Becquerel, qu'un grand nombre de corps sont doués d'une phosphorescence de très courte durée (quelques dix-millièmes de seconde) ; d'autre part, certains composés regardés comme fluorescents, les sels d'uranium et les platino-cyanures entre autres, s'illuminent dans le phosphoroscope. La fluorescence peut donc être considérée comme une phosphorescence intense, qui s'éteint trop vite pour qu'on puisse observer l'émission de lumière dans l'obscurité.

III. — OPTIQUE PHYSIQUE

CHAPITRE PREMIER

INTERFÉRENCES DE LA LUMIÈRE

561. *Nature de la lumière.* — Les phénomènes que l'on comprend sous la dénomination d'Optique physique sont ceux dont l'étude a conduit à la connaissance de la nature intime de l'agent lumineux.

La considération de ces phénomènes n'est d'ailleurs pas seulement importante au point de vue théorique ; il est en effet indispensable au médecin de connaître la nature intime de la lumière pour comprendre les théories de la perception des couleurs par l'œil humain et pour se rendre compte du mode de fonctionnement d'un certain nombre d'instruments dont la clinique utilise journallement les indications.

Ce n'est pas ici le lieu d'exposer les diverses hypothèses émises pour expliquer la nature de la lumière ; aussi nous bornerons-nous à dire que la théorie des *ondulations*, soutenue par Huygens, puis

développée et complétée par les recherches de Young et surtout de Fresnel est la seule qui ait permis, non seulement d'expliquer rationnellement les phénomènes connus, mais encore de déduire, des hypothèses qui en sont la base, des conséquences théoriques que l'expérience a vérifiées. Aussi la théorie des ondulations doit-elle être regardée comme l'une des théories physiques le plus sûrement établies.

Nous avons fait remarquer, au début de cet ouvrage (§ 5), que le principe de la conservation de la matière conduisait à conclure que tous les phénomènes physiques sont des phénomènes de mouvement. Nous admettrons donc que *la lumière est engendrée par un mouvement vibratoire*, dont nous apprendrons bientôt à déterminer les éléments (durée de vibration, longueur d'onde, direction des vibrations, etc.); c'est cette hypothèse qui est la base de la théorie des ondulations.

La lumière se propageant dans les espaces vides de matière pondérable, nous admettrons que les vibrations génératrices de la lumière sont celles d'un fluide particulier, l'*éther*; ce fluide, distinct de la matière pondérable, doit exister aussi bien dans les espaces interplanétaires que dans les espaces intermoléculaires des corps et posséder en outre des densités différentes dans les divers milieux.

Une source lumineuse devra, d'après ce qui précède, être regardée comme un centre vibratoire analogue à ceux que nous avons eu à considérer dans l'étude du son.

562. Interférence de deux mouvements de même période. — De l'analogie qui existe entre la nature de la lumière et celle du son, il résulte que les conséquences que nous avons établies aux paragraphes 335 et 343, en ce qui concerne les mouvements vibratoires caractéristiques du son, sont également applicables aux mouvements vibratoires générateurs de la lumière. Donc :

1° Les vitesses, que possède à deux époques différentes une molécule d'éther animée d'un mouvement vibratoire déterminé, sont égales et de même signe lorsque l'intervalle de temps qui sépare les deux époques est égal à un nombre pair de demi-périodes du mouvement vibratoire considéré; ces vitesses sont égales et de signes contraires lorsque l'intervalle de temps qui sépare les deux époques est égal à un nombre impair de demi-périodes;

2° Dans un milieu isotrope, deux molécules d'éther, situées à des distances différentes d'un même centre d'ébranlement ou de deux centres d'ébranlement *identiques* (§ 343), seront constamment

animées au même instant de vitesses égales et de même sens, si la différence des distances de chacune des molécules au centre qui lui transmet le mouvement est égale à un nombre pair de demi-longueurs d'onde $\frac{\lambda}{2}$ du mouvement vibratoire considéré; les deux molécules d'éther seront constamment animées, au même instant, de vitesses égales mais de sens contraires, si la différence des mêmes distances est égale à un nombre impair de $\frac{\lambda}{2}$.

On déduit immédiatement de là, comme pour les mouvements vibratoires sonores, les conditions de l'interférence des mouvements vibratoires lumineux, conditions qui sont évidemment identiques à celles que nous avons établies pour le son (§ 343). Soient donc deux mouvements vibratoires lumineux de même période, originaires d'une même source, ou de deux sources distinctes mais identiques entre elles. Lorsque ces deux mouvements arriveront, suivant la même direction, à une même molécule d'éther M, les vitesses qu'ils communiqueront à cette molécule seront de même signe ou de signes contraires suivant que la différence des chemins parcourus par les deux mouvements, pour arriver en M, sera égale à un nombre pair ou à un nombre impair de $\frac{\lambda}{2}$ des mouvements considérés.

Soit en particulier le cas où les deux mouvements transmis simultanément en M ont même amplitude; dans ces conditions :

Lorsque la différence des chemins parcourus est égale à un nombre pair de $\frac{\lambda}{2}$, l'amplitude du mouvement résultant en M sera double de celle de chacun des mouvements composants, et l'intensité lumineuse résultante, qui est proportionnelle au carré de l'amplitude, y sera quatre fois plus grande que l'intensité apportée en ce même point par chacun des mouvements composants;

Lorsque, au contraire, la différence des chemins parcourus est égale à un nombre impair de $\frac{\lambda}{2}$, l'amplitude du mouvement résultant, et par suite l'intensité lumineuse, seront nulles au point M.

On peut vérifier expérimentalement l'exactitude des faits que nous venons d'énoncer, au moyen des miroirs ou du biprisme de Fresnel, des demi-lentilles de Billet, etc.

Chacune de ces dispositions expérimentales a d'ailleurs pour but d'obtenir deux images d'une même source, c'est-à-dire de réaliser la condition, énoncée ci-dessus, relative à deux sources *identiques* ou telles que les vitesses qui en partent soient à chaque instant égales et de même signe.

Les miroirs de Fresnel consistent en deux miroirs plans qui doivent faire entre eux un angle voisin de 180° . Près du bord externe

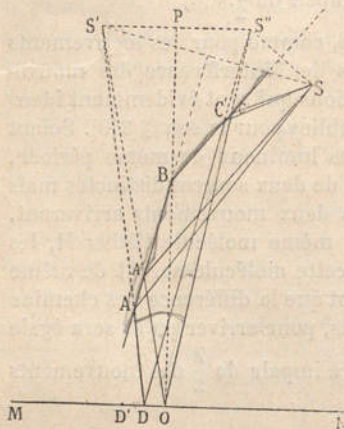


Fig. 340. — Expérience des miroirs de Fresnel.

de l'un d'eux, on dispose une fente étroite, éclairée par une source, dirigée parallèlement à la ligne d'intersection des plans des miroirs et située dans une position telle que les rayons lumineux qui passent à travers la fente tombent sur l'une ou sur l'autre des deux surfaces planes réfléchissantes. La figure 340 représente en AB, en BC et en S la coupe des miroirs et de la fente suivant un plan perpendiculaire à celle-ci.

On voit que l'on peut faire abstraction de la fente lumineuse S, ainsi que des miroirs AB et BC, et supposer qu'il existe, aux points S' et S'', images vir-

tuelles de S, deux sources identiques entre elles.

Considérons dès lors un écran MN normal à la droite PO menée perpendiculairement sur le milieu de S'S''. Les mouvements qui, partis de S' et de S'', arrivent simultanément en O ont parcouru des chemins égaux S'O et S''O; les vitesses qu'ils apportent en O sont donc toujours égales et de même signe, et l'intensité lumineuse en ce point sera maxima. Au contraire, en un point voisin D, tel que $S''D - S'D = \frac{\lambda}{2}$, les vitesses qui arrivent simultanément sont toujours égales et de signes contraires; comme d'ailleurs leurs directions S'D et S''D sont sensiblement les mêmes, ces vitesses s'annulent en ce point, où règnera donc l'obscurité. Mais au point D', tel que $S''D' - S'D' = 2 \frac{\lambda}{2}$, les vitesses transmises par S' et S''

seront de nouveau concordantes, et l'intensité lumineuse atteindra encore en ce point une valeur maxima.

En résumé, le phénomène étant évidemment symétrique de part et d'autre de O, il existera, de chaque côté de ce point, une succession d'intensité lumineuse maxima et d'obscurité complète. Comme, en outre, les considérations précédentes s'appliquent à tout plan parallèle au plan de la figure, il se formera, sur l'écran MN, une série de bandes alternativement brillantes et obscures, auxquelles on a donné le nom de *franges d'interférence*.

Pour une même position de l'écran et une même source lumineuse S, la distance de deux franges successives dépend de l'intervalle qui sépare les deux images S', S'' de la source; d'autre part les franges se forment évidemment à toute distance des points S' et S'', l'écartement de deux franges successives dépend aussi, toutes choses égales d'ailleurs, de la distance OP de l'écran à ces points. Si l'on considère un plan normal à la fente S, le plan de la figure par exemple, on peut vérifier expérimentalement et démontrer mathématiquement que le lieu des points de ce plan où se forme une frange de même rang est une hyperbole qui a pour foyer les deux points S', S''.

Les franges d'interférence étant très étroites, il est bon, pour les observer, de se servir d'une loupe que l'on place dans la région commune aux faisceaux réfléchis par chacun des miroirs; l'aspect

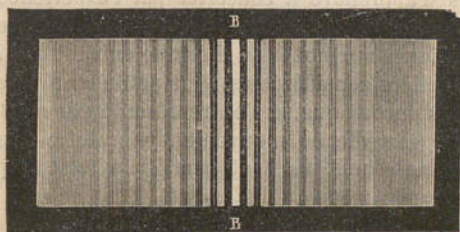


Fig. 341. — Aspect des franges d'interférence.

de ces franges est alors celui qui est représenté sur la figure 341.

563. **Détermination de la longueur d'onde des mouvements vibratoires lumineux.** — On démontre que, si l'on appelle d la distance du milieu O de la frange centrale au milieu D' de la première frange brillante suivante et ω l'angle S'OS'', on a :

$$\lambda = d \sin \omega, \quad (1)$$

λ étant la longueur d'onde à déterminer. Or il est possible de mesurer d et ω et par suite de calculer, au moyen de la relation précédente, la valeur de λ .

564. **Influence des radiations employées sur la largeur des franges.** — Si, sans modifier la disposition expérimentale précédente, on emploie successivement, pour produire les phénomènes d'interférence, des lumières monochromatiques de couleurs différentes, on observe que les franges, alternativement brillantes et obscures, qui se forment sur l'écran, sont d'autant plus espacées et d'autant plus larges que la lumière employée est moins réfrangible.

Les radiations chimiques et calorifiques donnent lieu à des phénomènes analogues à ceux que l'on obtient avec les radiations lumineuses. Dans le cas des radiations chimiques, il suffit de remplacer l'écran par un papier sensible pour avoir une épreuve photographique des franges qui, avec les radiations ultra-violettes, sont plus serrées encore que les franges obtenues avec la lumière violette. Lorsqu'il s'agit des radiations calorifiques, on peut mettre en évidence les bandes froides et les bandes chaudes à l'aide du holomètre de Langley; ces franges infra-rouges sont plus espacées que les franges rouges.

Puisque, toutes choses égales d'ailleurs, λ est proportionnel à d d'après la formule (1), la différence de largeur des franges que nous venons d'apprendre à constater par l'expérience conduit à cette conclusion que : la longueur d'onde des diverses lumières monochromatiques augmente ou diminue suivant que la réfrangibilité de la lumière considérée est plus petite ou plus grande.

Remarquons encore que, si l'on représente par n le nombre de vibrations par seconde du mouvement vibratoire d'une lumière dont la longueur d'onde est λ et par V la vitesse de propagation de la lumière, on a :

$$\lambda = \frac{V}{n}, \quad \text{d'où :} \quad n = \frac{V}{\lambda},$$

relation qui permet de calculer n lorsque V et λ ont été préalablement mesurés.

Le tableau suivant contient les résultats auxquels on arrive en calculant, comme nous venons de l'indiquer, les valeurs de λ et de n pour les diverses radiations spectrales.

Nature des radiations.	Longueur d'onde (λ) en microns (μ) ou millièmes de millimètres.	Nombre (n) de vibrations par seconde.
Raie B (rouge)	0.6878	435 trillions.
— C (rouge)	0.6564	456 —
— D (jaune)	0.5888	509 —
— E (vert)	0.5260	569 —
— F (bleu)	0.4843	630 —
— G (violet)	0.4291	698 —
— H (violet)	0.3928	764 —

565. **Spectres d'interférence.** — Si l'on emploie, pour produire les franges d'interférence, non plus une lumière monochromatique, mais une lumière composée, la lumière solaire par exemple, on n'obtient plus sur l'écran des bandes alternativement brillantes et obscures, mais seulement une série de franges irisées, véritables spectres que l'on désigne sous le nom de *spectres d'interférence*. Ces spectres ont le violet tourné du côté de la frange centrale qui est sensiblement blanche; ils sont d'autant moins nets qu'ils sont plus éloignés de cette frange, mais les premiers eux-mêmes sont loin d'être aussi purs que les spectres obtenus avec les prismes.

La production de ces spectres d'interférence résulte de ce que nous venons de dire relativement à la variation de la largeur des franges avec la couleur de la lumière. Chaque radiation simple contenue dans la lumière blanche donne sur l'écran un système de franges dont les intervalles dépendent du λ de cette radiation. Les effets observés sur l'écran résultent donc de la superposition des divers systèmes de franges correspondant aux diverses radiations simples qui constituent la lumière employée. Au point central O (fig. 340), toutes ces franges se superposent et reconstituent la lumière de la source. Mais la première frange violette suivante étant plus rapprochée de la frange centrale que la première frange verte et celle-ci plus rapprochée à son tour que la première frange rouge, ces diverses franges ne se recouvriront pas exactement; l'on comprend dès lors qu'il puisse se former un spectre dont le violet sera situé du côté de la frange centrale. Il en sera de même pour les franges suivantes.

Il importe de remarquer, en outre, qu'en chaque point de l'écran plusieurs radiations de couleurs différentes seront superposées. La couleur observée en chacun de ces points n'est donc pas simple; aussi les spectres d'interférences sont-ils moins purs que ceux que fournissent les prismes.

566. **Coloration des lames minces.** — Lorsqu'un faisceau de lumière blanche tombe sur une lame mince d'un corps transparent, la lumière réfléchie, de même que la lumière transmise par cette lame, présentent des colorations parfois très intenses dont la cause, due à des phénomènes d'interférence, est absolument indépendante de l'absorption de la lumière par le corps considéré.

On peut observer ces colorations avec des lames de mica ou de verre de petite épaisseur, avec une lame d'air très mince emprisonnée entre deux lames de verre ou avec une faible couche de liquide étalée à la surface d'un autre liquide.

Pour expliquer l'apparition de ces couleurs, il y a lieu de distinguer deux cas, suivant que l'on observe ces phénomènes dans la lumière réfléchie ou dans la lumière transmise.

Soient une lame transparente ELFK (fig. 342) d'épaisseur uniforme comprise entre deux milieux plus réfringents et un faisceau incident venu d'une source assez éloignée pour que les rayons DE, D'G... puissent être regardés comme parallèles. Les mouvements transmis suivant DE, D'G... auront donc parcouru, au moment où ils atteignent les points E, G... des chemins que l'on pourra regarder comme égaux si la lumière arrive sous une incidence sensiblement normale.

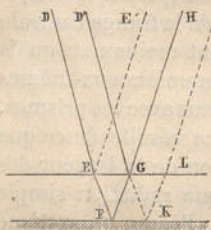


Fig. 342. — Coloration des lames minces.

En E le rayon DE se divise en deux parties, l'une qui se réfléchit suivant EE', l'autre qui se réfracte suivant EF; en F se produit une nouvelle division du rayon dont une partie se réfléchit suivant FG et dont l'autre se réfracte suivant une direction, parallèle à DE, qui n'est pas tracée sur la figure; le rayon FG subit également en G une nouvelle réfraction suivant GH parallèle à EE' et une nouvelle réflexion suivant GK; enfin le rayon GK se divise de même en deux parties, l'une qui se réfracte suivant une direction, parallèle à DE, qui n'est pas représentée sur la figure, l'autre qui se réfléchit suivant KL, mais qui est alors assez faible pour qu'on puisse la négliger.

Tout autre rayon incident, D'G par exemple, se comporte évidemment de même; en outre la considération des angles de réflexion et de réfraction montre que tous les rayons EE', GH, LL'... réfléchis dans le premier milieu sont parallèles entre eux et qu'il

en est de même pour les divers rayons transmis à travers la lame.

Lumière réfléchie. — Il résulte de ce que nous venons de dire que de chaque point de la lame, tel que G par exemple, partent deux rayons ou deux mouvements vibratoires qui se propagent suivant la même direction GH; l'un provient de la partie du rayon incident D'G qui s'est réfléchi en G, l'autre est fourni par la portion du rayon DE qui s'est réfractée en E, réfléchi en F et réfractée de nouveau en G. La différence de marche en G des deux rayons qui sont superposés suivant GH est donc égale à $EF + FG$ et si les rayons incidents sont sensiblement normaux à la lame, on peut regarder cette différence de marche comme égale au double de l'épaisseur e de la lame. D'autre part, le second rayon a subi en F une réflexion sur un milieu plus réfringent que le milieu de la lame dans lequel il se propageait, et a éprouvé de ce fait (§ 345) un retard de $\frac{1}{2}\lambda$ qu'il faut ajouter au précédent. Les deux mouvements vibratoires qui se superposent suivant GH présentent donc une différence de marche égale à $2e + \frac{\lambda}{2}$; comme ils proviennent d'ailleurs d'une même source, ces rayons ajouteront ou retrancheront leurs effets suivant que cette différence de phase $2e + \frac{\lambda}{2}$ sera égale à un nombre pair ou impair de $\frac{\lambda}{2}$.

Dans le cas où, l'épaisseur de la lame étant uniforme, les rayons incidents sont monochromatiques, l'ensemble des rayons réfléchis GH, LL'... aura une intensité uniforme dont la valeur dépendra d'ailleurs de la valeur de la différence $2e + \frac{\lambda}{2}$ et de l'intensité relative des deux rayons superposés suivant GH, LL'...

Si, dans ce même cas, la lumière incidente est composée, c'est-à-dire constituée par diverses radiations ou par divers mouvements vibratoires de longueurs d'onde différentes, les vitesses des mouvements vibratoires dans les deux rayons réfléchis qui se propagent suivant une même direction GH..... seront concordantes pour certaines radiations et discordantes pour d'autres, suivant la valeur de $2e$ par rapport au λ de ces radiations. Certaines radiations seront donc renforcées, tandis que d'autres seront affaiblies ou éteintes; la lumière réfléchie aura par suite une composition différente de la lumière incidente et présentera une coloration uniforme qui

résultera de la superposition des diverses radiations simples dont les vitesses suivant GH s'ajoutent ou ne se détruisent que partiellement. La couleur du faisceau réfléchi dépendra par suite de l'épaisseur de la lame.

Lumière transmise. — Tous les rayons transmis à travers la lame étant parallèles par suite du parallélisme des rayons incidents, de chaque point F, K... de la face postérieure de la lame partent et se propagent suivant la même direction parallèle à DE et non représentée sur la figure, deux rayons ou deux mouvements vibratoires ; en K par exemple, ces deux mouvements proviennent l'un du rayon D'G qui a subi deux réfractions en G et en K, l'autre du rayon DE qui a subi une réfraction en E, deux réflexions sur un milieu plus dense en F et en G et une seconde réfraction en K ; ce dernier mouvement présente donc, par rapport au premier, une différence de marche égale à $EF + FG$, ou à $2e$ si l'incidence est sensiblement normale. Mais ce second rayon éprouve en outre deux

retards égaux chacun à $\frac{1}{2} \lambda$, par suite des deux réflexions en F et en G ; la différence réelle de marche pour chaque couple de rayons qui se superposent en F, K..... est donc égale à $2e + 2\frac{\lambda}{2}$ ou $2e + \lambda$.

Ces couples de rayons peuvent interférer et donner ainsi naissance à des phénomènes analogues à ceux que nous avons étudiés pour la lumière réfléchie.

Par suite d'ailleurs des valeurs différentes, $2e + \frac{\lambda}{2}$ et $2e + \lambda$, présentées par les différences de marche des rayons qui se superposent, on voit que les radiations qui, pour une certaine valeur de e , se détruisent dans le cas de la lumière réfléchie, ajoutent leurs effets dans le cas de la lumière transmise. Il en résulte que lorsque la lumière incidente est complexe, la couleur de la lumière transmise est complémentaire de celle de la lumière réfléchie. De plus, à cause de l'inégalité d'intensité des deux rayons qui interfèrent, inégalité qui est plus marquée pour les rayons transmis que pour les rayons réfléchis, l'interférence est moins complète pour les premiers que pour les seconds et la couleur de la lumière transmise est moins saturée que celle de la lumière réfléchie.

567. **Anneaux de Newton.** — Que l'on observe ces phénomènes de coloration dans la lumière réfléchie ou dans la lumière transmise, la teinte est uniforme dans toute l'étendue de la lame ou

variable avec les régions, suivant que l'épaisseur de la lame mince est elle-même uniforme ou variable. En particulier, dans l'expérience des *anneaux de Newton*, où la lame mince est la couche d'air d'épaisseur variable comprise entre la face convexe d'une lentille plan-convexe et une surface plane sur laquelle la lentille repose, le phénomène doit évidemment être symétrique par rapport au point de contact des faces plane et convexe en regard. Aussi le phénomène se présente-t-il dans ce cas sous la forme d'anneaux alternativement brillants et obscurs (fig. 343), lorsque la lumière employée est monochromatique. Le centre des anneaux réfléchis est obscur tandis que celui des anneaux transmis est brillant et, à partir du centre, l'ordre des anneaux brillants et obscurs est toujours inverse dans la lumière transmise et dans la lumière réfléchie.



Fig. 343. — Anneaux de Newton.

En lumière blanche, tous les anneaux sont irisés, mais l'ordre suivant lequel se succèdent les couleurs dans la lumière transmise est inverse de celui suivant lequel elles se présentent dans la lumière réfléchie. Les anneaux transmis sont en outre plus lavés de blanc et moins visibles que les anneaux réfléchis.

568. **Photographie des couleurs.** — La méthode de Lippmann pour la reproduction photographique des couleurs est basée sur les phénomènes d'interférence.

La plaque photographique, recouverte d'une couche de collodion sensible préparé d'une manière spéciale, forme la paroi antérieure d'une auge dans laquelle on verse du mercure, et l'on fait former sur cette plaque, dans la chambre noire, l'image d'un spectre par exemple. La lumière incidente traverse la couche sensible, puis se réfléchit sur la surface du mercure contre laquelle cette couche est adossée et traverse de nouveau en sens inverse la couche de collodion. Les radiations incidentes et réfléchies interfèrent dès lors comme les ondes sonores considérées au paragraphe 345, et il y a par suite, dans l'épaisseur de la couche de collodion, des points où les effets chimiques de ces radiations se détruisent, d'autres points où ces effets s'ajoutent. Au niveau de ceux-ci, le sel d'argent étant décomposé, il se forme un dépôt d'argent réduit. L'ensemble de ces dépôts subdivise la couche sensible en une série de lames minces dont l'épaisseur est précisément égale, dans chaque région de la plaque, à la demi-longueur d'onde de la lumière qui a provoqué le dépôt dans cette région.

Après que la plaque a été soumise, dans les conditions que nous venons d'indiquer, à l'action de la lumière, on développe et l'on fixe à l'aide des réactifs ordinaires. Si l'on éclaire alors cette plaque au moyen de la lumière blanche, des phénomènes d'interférence, analogues à ceux que nous avons considérés plus haut et dus à la réflexion sur les dépôts d'argent formés à l'intérieur de la couche de collodion, prennent naissance. La couleur observée en chaque point est sensiblement celle qui a pour longueur d'onde le double de la distance des dépôts stratifiés d'argent qui existent à ce niveau, c'est-à-dire celle de la lumière qui a primitivement agi au point considéré.

En chaque région d'ailleurs, la couleur varie avec l'inclinaison sous laquelle on observe la plaque; elle varie aussi lorsque l'on souffle sur la couche de collodion, car, dans ces conditions, l'épaisseur de la couche de collodion augmente par absorption de vapeur d'eau, ce qui entraîne un accroissement de la distance qui sépare les couches.

CHAPITRE II

DIFFRACTION

569. Cause de la diffraction. Principe de Huyghens. — On désigne sous le nom de *diffraction* les phénomènes qui prennent naissance lorsque la lumière rase le bord d'un corps opaque. Leur explication repose à la fois sur l'interférence de la lumière, dont nous avons fait l'étude sommaire dans le chapitre précédent, et sur le principe de Huyghens que nous allons faire connaître.

Soit un centre vibratoire ou lumineux C (fig. 344) et une onde HK, c'est-à-dire une surface sur laquelle se trouve réparti, à un moment donné, le mouvement parti de C un certain temps avant l'instant considéré. Huyghens admet que la quantité de lumière qui arrive réellement en un point quelconque O est la même que celle qui arriverait en ce point si la source C n'existait pas et si chaque point de l'onde HK était un centre vibratoire lumineux, l'intensité du mouvement vibratoire étant, en chaque point de HK, en raison inverse du carré de la distance du point à l'origine C du mouvement (§ 507).

Ce principe admis, divisons, dans le plan de la figure, la section HK de l'onde en arcs élémentaires AB, BD, DE... tels que

$$\left. \begin{aligned} BO - AO &= \frac{\lambda}{2} \\ DO - BO &= \frac{\lambda}{2} \\ \dots\dots\dots \end{aligned} \right\} (1)$$

λ étant la longueur d'onde de la lumière, supposée monochromatique, émise par la source C.

Les vitesses envoyées en O par les divers points compris dans

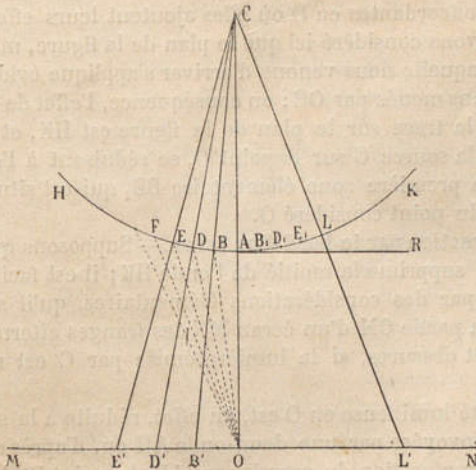


Fig. 344. — Principe d'Huyghens et diffraction par le bord d'un écran.

deux arcs élémentaires successifs sont discordantes entre elles, d'après les égalités (1). Or on démontre que, lorsque les arcs sont un peu éloignés du point A, qui est le pôle de l'onde par rapport à O, la somme des mouvements envoyés par chacun de ces arcs au point O est constante. Il résulte de là que deux arcs successifs détruisent alors mutuellement et rigoureusement leurs effets. Il n'en est pas de même pour les arcs voisins du pôle A, car ces arcs n'ont plus même étendue et sont d'autant plus grands qu'ils sont plus rapprochés du pôle. Par suite, l'un quelconque de ces

arcs, celui qui est situé à gauche de F par exemple, ne détruit pas complètement l'action de l'arc FE, qui se trouve à droite du même point; la portion ε de l'arc FE, dont l'action sur le point O n'est pas détruite par celle de l'arc situé à gauche de F, détruit l'action d'une portion égale ε de l'arc suivant ED; et la portion ε' encore active de ED, portion plus grande que ε , détruit à son tour l'action d'une portion égale ε' de l'arc BD et ainsi de suite. On voit par là que l'action de la demi-onde AH sur le point O, se réduit finalement à celle d'une portion du premier arc élémentaire BA. Il en est évidemment de même pour l'autre demi-onde AK, dont l'action sur le même point O se réduit à celle d'une portion de l'arc AB₁; les actions des parties actives de AB et de AB₁ sont d'ailleurs concordantes en O où elles ajoutent leurs effets.

Nous n'avons considéré ici que le plan de la figure, mais la conclusion à laquelle nous venons d'arriver s'applique évidemment à tous les plans menés par OC; en conséquence, l'effet de l'onde entière dont la trace sur le plan de la figure est HK, et par suite l'action de la source C sur le point O, se réduisent à l'effet d'une partie de la première zone élémentaire BB₁ qui est située autour du pôle A du point considéré O.

370. Diffraction par le bord d'un écran. — Supposons qu'un écran opaque AR supprime la moitié de l'onde HK; il est facile de faire concevoir, par des considérations élémentaires, qu'il se formera alors sur la partie OM d'un écran MN des franges alternativement brillantes et obscures, si la lumière émise par C est monochromatique.

L'intensité lumineuse en O est, en effet, réduite à la somme des intensités envoyées par une demi-onde AH ou, d'après ce qui précède, par une portion du premier arc AB. Au point B', tel que CB' limite sur l'onde HK un arc AB égal au premier arc élémentaire, l'intensité lumineuse sera égale à la résultante des effets d'une demi-onde BH, augmentée de l'action de l'arc élémentaire BA situé à droite de B. L'intensité en B' sera donc plus grande que l'intensité en O. Au point D', tel que CD' limite sur AH une longueur AD qui comprend deux arcs élémentaires, l'intensité sera égale à la résultante des effets d'une demi-onde DH augmentée de l'action des deux arcs DB et BA. Or les vitesses envoyées par DB et par BA sont discordantes entre elles, et se détruisent en partie; l'intensité lumineuse en D' sera donc inférieure à l'intensité qui existe en B'.

On démontrerait de même qu'en E' , tel que AE comprenne trois arcs élémentaires, l'intensité lumineuse sera plus grande qu'en D' , et ainsi de suite. Il doit donc exister, à gauche de O , une série de franges d'interférence qui disparaissent d'ailleurs en un éclaircissement uniforme à une petite distance de O .

Il est facile de concevoir aussi que, à droite et à une petite distance de O , la demi-onde AH enverra une certaine quantité de lumière; il en sera ainsi jusqu'au point L' tel que les arcs élémentaires AB , BD ... soient assez éloignés du pôle correspondant L pour détruire rigoureusement leurs effets en ce point L' . L'étude mathématique du phénomène montre d'ailleurs que l'éclaircissement diminue progressivement et régulièrement, sans alternatives de maxima et de minima, depuis O jusqu'en L' , où commence l'ombre absolue de l'écran.

Les franges obtenues par diffraction sont irisées, comme les franges d'interférences et pour la même raison, lorsque la lumière employée est composée.

On observe également des franges de diffraction si un second écran opaque est placé en face et à une faible distance du premier, de façon à limiter l'onde HK par une fente étroite, à bords parallèles; les franges se montrent alors non-seulement sur la portion de l'écran MN qui devrait être éclairée par le point C en admettant la propagation rectiligne de la lumière, mais encore à une faible distance dans l'ombre géométrique des deux écrans.

Lorsqu'on limite l'onde HK par un écran percé d'un trou, les franges qui se dessinent sur MN ont la forme d'anneaux concentriques.

Ajoutons que, si ces phénomènes de diffraction ne sont pas visibles dans les conditions ordinaires, c'est que les sources lumineuses ont alors des dimensions finies et que chaque point de la source donne lieu à un système correspondant de franges dont la superposition enlève toute netteté au phénomène. Aussi, malgré l'existence de la diffraction, n'avons-nous rien à changer aux conséquences que nous avons déduites, en Optique géométrique, de la propagation rectiligne de la lumière.

574. **Réseaux.** — Parmi les diverses dispositions expérimentales que l'on a imaginées pour donner naissance à des phénomènes de diffraction, il en est que nous devons signaler de préférence dans cet ouvrage; de ce nombre est celle qui consiste dans l'emploi des réseaux.

On appelle *réseau* une série d'espaces parallèles, rectilignes ou

courbes, alternativement opaques et transparents et de largeur très petite. On obtient un réseau, par exemple, en traçant avec un diamant, sur une plaque de verre, une série de traits rapprochés et parallèles (50 au moins par millimètre) qui constituent autant d'intervalles opaques.

Nous ne pouvons entrer dans l'explication des phénomènes auxquels donne naissance la diffraction de la lumière par les bords des traits opaques, et nous nous bornerons à indiquer sommairement l'aspect sous lequel ils se présentent.

Si l'on regarde à travers un réseau une fente lumineuse parallèle aux traits opaques et transparents, la fente lumineuse apparaît sans modification de grandeur, mais un peu moins brillante; de part et d'autre de la fente existe un espace obscur suivi d'un spectre dont le violet est en dedans, dont les couleurs sont très pures et où l'on distingue facilement des raies de Fraunhofer lorsque la fente est éclairée par la lumière solaire. Au delà de ce premier spectre se trouve un nouvel espace obscur, moins large que le premier, puis une série de spectres de plus en plus étalés et empiétant de plus en plus les uns sur les autres, si bien que les couleurs se dégradent et finissent par disparaître. Le spectre fourni par les réseaux est dit *spectre normal* parce que la déviation d'une radiation quelconque est proportionnelle à la longueur d'onde de cette radiation. C'est grâce à cette proportionnalité que l'on a pu mesurer, à l'aide des réseaux, la longueur d'onde des diverses radiations.

On observe des phénomènes analogues à ceux des réseaux lorsqu'on regarde une bougie à travers les barbes d'une plume, ou à travers les cils, les paupières étant presque closes.

Les fibres musculaires striées sont formées de disques opaques et transparents, assez minces pour donner lieu à la production des spectres des réseaux; les premiers spectres sont très nets et l'on y distingue les principales raies de Fraunhofer. Ranvier, qui a le premier obtenu ce réseau musculaire auquel il a donné le nom de *myspectroscope*, a pu mesurer l'écartement des stries des différentes fibres musculaires d'après la déviation des spectres auxquels ces stries donnent naissance.

La réflexion de la lumière sur des stries alternativement polies et rugueuses donne lieu aux mêmes phénomènes que le passage de la lumière à travers les réseaux. C'est ainsi que s'expliquent les vives colorations de la nacre, des plumes de divers oiseaux, de certains échantillons de métaux à demi polis, etc.

Edmond Rose a proposé d'utiliser les spectres fournis par les réseaux à stries parallèles pour diagnostiquer les particularités que présentent certains yeux au point de vue de la perception des couleurs.

572. **Couronnes irisées produites par des corpuscules.** — La diffraction de la lumière par les bords de corpuscules opaques, de diamètre sensiblement constant, interposés en assez grand nombre entre une source lumineuse et l'œil de l'observateur, donne lieu à des phénomènes de diffraction qui, par raison de symétrie, se présentent sous la forme d'anneaux circulaires irisés, avec violet en dedans, et dont le diamètre, pour un cercle de même rang, est en raison inverse du diamètre moyen des corpuscules.

On observe de tels anneaux autour du soleil ou de la lune lorsque de fines gouttelettes d'eau sont en suspension dans l'atmosphère; on en observe également en regardant un point lumineux ou la flamme d'une bougie à travers une lame de verre recouverte, soit d'une poussière très fine à grains sensiblement égaux, telle que la poudre de lycopode, soit des globules sanguins desséchés.

Les couronnes par diffraction peuvent apparaître spontanément et être dues à des corpuscules situés dans les milieux de l'œil; on aperçoit notamment ces couronnes au moment du réveil et dans le cours de certaines affections oculaires.

CHAPITRE III

POLARISATION ET DOUBLE RÉFRACTION

573. **Direction des vibrations lumineuses.** — Pour établir la théorie des phénomènes d'interférence et de diffraction, nous n'avons eu à faire qu'une seule hypothèse, à savoir, que la lumière est engendrée par les vibrations périodiques de l'éther. L'explication des phénomènes dont il va être question rend nécessaire une seconde hypothèse relative à la direction des vibrations, hypothèse qui, comme celle que nous venons de rappeler, est confirmée *a posteriori* par l'expérience. Nous admettons que : les vibrations génératrices de la lumière sont perpendiculaires à la direction rectiligne suivant laquelle elles se propagent. Les phénomènes de polarisation seraient, en effet, incompréhensibles si les vibrations

de l'éther s'effectuaient, comme celles de l'air qui transmet un son, suivant leur direction rectiligne de propagation.

574. **Lumière naturelle et lumière polarisée.** — L'hypothèse précédente admise, on conçoit que la trajectoire d'une molécule d'éther en vibration puisse être rectiligne, circulaire ou elliptique, la droite, le cercle ou l'ellipse étant perpendiculaires à la ligne de propagation de la lumière. L'étude, plus complète que nous ne pouvons le faire ici, des phénomènes de polarisation montre qu'en effet la trajectoire d'une molécule d'éther en vibration peut avoir, suivant les cas, l'une ou l'autre des formes que nous venons d'indiquer.

Lorsque les vibrations de l'éther s'effectuent suivant une droite, on conçoit, *a priori*, que la direction de la trajectoire rectiligne puisse être fixe et invariable ou qu'elle change, au contraire, d'un instant à l'instant suivant. En d'autres termes, soit un rayon lumineux perpendiculaire au plan de la figure 349 (pag. 797) qu'il rencontre en O ; on conçoit que la molécule d'éther qui se trouve en ce point effectue constamment ses vibrations suivant une direction fixe PP' ; mais on conçoit aussi que ces vibrations puissent s'effectuer, tantôt suivant PP', tantôt suivant XX', SS', ou tout autre direction rectiligne qui passe par O. Or l'aspect que présentent les phénomènes de polarisation, dans les diverses circonstances où il est possible de les observer, conduit, comme nous allons le voir plus loin, à admettre que :

1° Dans un rayon de *lumière naturelle*, c'est-à-dire venue directement d'une source, les choses se passent, en effet, comme si les vibrations des molécules d'éther avaient une trajectoire rectiligne dont la direction serait continuellement variable après des intervalles de temps très courts ; les phénomènes auxquels donne lieu un pareil rayon doivent donc être symétriques par rapport à la ligne de propagation du mouvement vibratoire ;

2° Il est possible, par divers moyens dont quelques-uns seront indiqués ci-dessous, de détruire cette symétrie, en rendant par exemple fixe et invariable la direction suivant laquelle s'effectuent les vibrations des diverses molécules d'éther qui constituent les rayons lumineux ; la lumière est alors dite *polarisée rectilignement* et le plan déterminé par la ligne de propagation de la lumière et par la direction invariable des vibrations porte le nom de *plan de vibration*.

575. **Polarisation par réflexion.** — Recevons sur un miroir AB

(fig. 345), en verre noir par exemple, un rayon lumineux LI, provenant directement d'une source quelconque, de telle sorte que l'angle d'incidence soit de $54^{\circ} 35'$ et soit IR le rayon réfléchi correspondant; l'expérience montre que si l'on fait tourner le miroir AB autour du rayon incident comme axe, la direction suivie par le rayon réfléchi change mais l'intensité de ce rayon reste constante.

Mais si l'on reçoit le rayon IR, réfléchi par le premier miroir, sur un second miroir identique CD, de façon que l'angle d'inci-

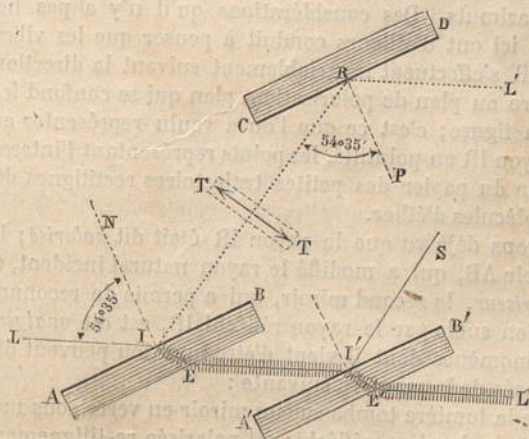


Fig. 345. — Polarisation de la lumière par réflexion et par réfraction simple.

dence soit encore de $54^{\circ} 35'$ on constate, en faisant tourner le miroir CD autour de IR comme axe, que le rayon réfléchi RL' présente des variations d'intensité très marquées suivant les positions relatives des deux plans d'incidence LIN et IRP. Lorsque ces deux plans coïncident (cas de la figure) le rayon RL' présente son maximum d'intensité; ce rayon est entièrement éteint si ces deux plans font entre eux un angle de 90° . Si, par la rotation du miroir CD autour de IR, on fait varier de 0 à 90° l'angle des deux plans d'incidence, l'intensité du rayon réfléchi RL' varie depuis la valeur maxima qu'elle peut avoir jusqu'à 0 . Le rayon IR présente donc, autour de sa ligne de propagation, une dissymétrie que ne présentait point le rayon LI; on dit qu'il est *polarisé*, et

l'on appelle *plan de polarisation* le plan d'incidence LIN sur le premier miroir.

Il faut, pour concevoir cette dissymétrie du rayon IR autour de sa ligne de propagation, admettre que les vibrations caractéristiques de la lumière ont lieu, pour ce rayon, suivant une direction fixe et invariable, perpendiculaire à sa ligne IR de propagation; la symétrie du rayon LI se conçoit dès lors si l'on admet que, pour ce rayon venu directement de la source, la direction des vibrations, toujours perpendiculaire à la ligne LI de propagation est perpétuellement variable et s'effectue successivement dans tous les azimuts. Des considérations qu'il n'y a pas lieu de reproduire ici ont d'ailleurs conduit à penser que les vibrations du rayon IR s'effectuent invariablement suivant la direction perpendiculaire au plan de polarisation, plan qui se confond ici avec celui de la figure; c'est ce que l'on a voulu représenter en traçant le rayon IR en pointillé, les points représentant l'intersection par le plan du papier des petites trajectoires rectilignes décrites par les molécules d'éther.

Nous avons déjà vu que le rayon IR était dit *polarisé*; le premier miroir AB, qui a modifié le rayon naturel incident, est appelé *polariseur*, le second miroir, qui a permis de reconnaître la modification subie par le rayon réfléchi IR, est dit *analyseur*.

Les phénomènes dont il vient d'être question peuvent dès lors être énoncés de la manière suivante :

Lorsque la lumière tombe sur un miroir en verre sous un angle de $54^{\circ} 35'$, la lumière réfléchie est polarisée rectilignement et le plan des vibrations est perpendiculaire au plan d'incidence;

Lorsqu'un miroir reçoit, sous un angle de $54^{\circ} 35'$, un rayon de lumière polarisée rectilignement, il le réfléchit sans l'affaiblir si le plan de vibration de ce rayon est perpendiculaire au plan d'incidence; il l'éteint complètement au contraire si le plan de vibration coïncide avec le plan d'incidence.

576. Polarisation par réfraction simple. — Lorsque, au lieu d'employer un miroir en verre noir pour réfléchir la lumière, on se sert d'une lame de verre transparent AB (fig. 345), tout rayon LI, que nous supposons encore tomber sous un angle de $54^{\circ} 35'$, sera partiellement réfléchi, partiellement réfracté. Si l'on reçoit alors sur un miroir noir A'B' le rayon réfracté L'I', de telle sorte que l'angle d'incidence soit encore $54^{\circ} 35'$, et que l'on fasse tourner le miroir A'B' autour de L'I' comme axe, le rayon L'I' ne donnera pas ou

donnera naissance à un rayon réfléchi, suivant que les plans d'incidence sur la lame AB et sur le miroir A'B' coïncideront ou non ; l'intensité du rayon réfléchi varie d'ailleurs avec l'angle que ces plans font entre eux et devient maxima lorsque cet angle est égal à 90° .

Il résulte de là que le rayon LT est polarisé et que son plan de vibration, qui se confond avec le plan d'incidence sur le miroir au moment de l'extinction du rayon réfléchi, coïncide avec le plan d'incidence de la lumière sur la lame AB. C'est ce que l'on a représenté, sur la figure, au moyen de hachures qui peuvent être regardées comme les petites trajectoires rectilignes des molécules d'éther.

L'analyse, à l'aide d'un miroir, du rayon IR réfléchi par la lame AB montre que, comme dans le cas de la réflexion par un miroir noir, ce rayon est polarisé et que ses vibrations s'effectuent perpendiculairement au plan d'incidence.

Donc, une lame transparente polarise dans deux plans rectangulaires les deux portions, réfléchie et réfractée, en lesquelles elle divise la lumière naturelle qu'elle reçoit; la lumière réfléchie vibre perpendiculairement au plan d'incidence, la lumière réfractée vibre dans ce plan. Réciproquement une lame de verre peut servir d'analyseur pour la lumière polarisée rectilignement; si le plan de vibration du rayon incident est perpendiculaire au plan d'incidence, le rayon est entièrement réfléchi; il est au contraire entièrement réfracté si son plan de vibration coïncide avec le plan d'incidence; dans le cas où les plans de vibration et d'incidence font un angle différent de 0 et de 90° , le rayon est partiellement réfléchi et partiellement réfracté.

577. **Proportion de lumière polarisée par réflexion ou réfraction simple. Angle de polarisation.** — En réalité le rayon réfléchi et le rayon réfracté ne sont pas en général uniquement constitués, comme nous l'avons supposé dans ce qui précède, par de la lumière polarisée; ils renferment, en effet, une proportion plus ou moins grande de lumière naturelle, si bien que l'on n'obtient pas toujours l'extinction complète que nous avons dit se produire pour une position convenable du miroir analyseur, mais seulement un minimum d'intensité.

Une analyse expérimentale des phénomènes, plus complète que nous ne pouvons l'indiquer ici, montre que le rayon réfléchi et le rayon réfracté par une même lame contiennent la même quantité

de lumière polarisée. La proportion de lumière polarisée est en outre d'autant plus grande que l'angle d'incidence est plus voisin d'une valeur déterminée, variable avec la nature de la substance réfléchissante, et à laquelle on a donné le nom d'*angle de polarisation*. Cet angle est de $54^{\circ} 35'$ pour le verre et c'est ce qui nous a fait choisir cette valeur dans les expériences précédentes; il est de $52^{\circ} 45'$ pour l'eau.

Brewster a montré que la tangente de l'angle de polarisation d'une substance était égale à l'indice de réfraction de cette substance; il résulte de cette loi que, si un rayon de lumière naturelle tombe sur la surface de séparation de deux milieux sous un angle égal à l'angle de polarisation, le rayon réfléchi et le rayon réfracté, en lesquels il se décompose, font entre eux un angle de 90° .

Tandis que le rayon réfléchi dans ces conditions est en général à peu près uniquement constitué par de la lumière polarisée, le faisceau réfracté contient en outre une certaine proportion de lumière naturelle. Si l'on veut diminuer cette proportion, il faut faire subir au rayon plusieurs réfractions successives par l'emploi de piles de glaces.

578. Polarisation par double réfraction. — La polarisation de la lumière naturelle est complète lorsqu'elle est obtenue par double réfraction; mais avant de faire l'étude de ce procédé de polarisation, il est nécessaire de dire en quoi consiste le phénomène de la double réfraction.

Double réfraction. — Nous n'avons étudié, en Optique géométrique, la réfraction que sur une classe de corps, celle des corps *isotropes*, c'est-à-dire des corps qui présentent la même constitution physique et en particulier la même élasticité dans toutes les directions autour d'un même point. Tous les corps ne satisfont pas à ces conditions et c'est en particulier le cas des corps cristallisés dans un système autre que le système cubique; pour ces corps, dits *anisotropes*, la réfraction de la lumière n'est plus réglée par les lois exposées plus haut (Optique géométrique. Chapitre III). En effet, un rayon incident qui traverse un corps anisotrope donne, en général, naissance à deux rayons réfractés; on dit que ces corps possèdent la *double réfraction* ou qu'ils sont *biréfringents*. Il y a lieu toutefois, au point de vue de l'étude de la double réfraction, de diviser les corps biréfringents en deux catégories.

La première catégorie comprend les corps qui cristallisent dans le système rhomboédrique ou dans celui du prisme droit à base

carrée ; leurs cristaux ont un axe de symétrie et les lois de leur double réfraction sont relativement simples.

Les corps de la deuxième catégorie sont ceux qui appartiennent aux autres systèmes cristallins ; les lois de la double réfraction dans ces corps sont fort complexes et nous ne nous en occuperons point.

Parmi les corps appartenant à la première catégorie, nous citerons le spath d'Islande, le quartz, le mica, la tourmaline, le corindon, la topaze, etc....

Le spath d'Islande, ou carbonate de chaux très pur et cristallisé, se prête fort bien, à cause de sa transparence parfaite et de la grosseur des échantillons que l'on trouve dans la nature, à l'étude des phénomènes de double réfraction. Les cristaux de spath ont la forme rhomboédrique ; ce sont des solides limités par six faces planes losangiques (fig. 346), parallèles entre elles deux à deux ; ils présentent 12 arêtes et 8 sommets. Parmi ces derniers, il en est deux, D et D', opposés l'un à l'autre, qui sont formés chacun par la réunion de trois angles plans obtus égaux entre eux ; les autres sommets du cristal résultent de la réunion d'un angle obtus avec deux angles aigus. La ligne AB, qui joint les deux sommets D et D', porte le nom d'*axe cristallographique* du cristal ; un cristal de dimensions finies pouvant d'ailleurs être considéré comme constitué par une infinité de petits cristaux qui présentent même forme et même orientation que lui, toute droite parallèle à l'axe cristallographique jouira des mêmes propriétés que cet axe ; chacune de ces parallèles est appelée *axe optique* du cristal.

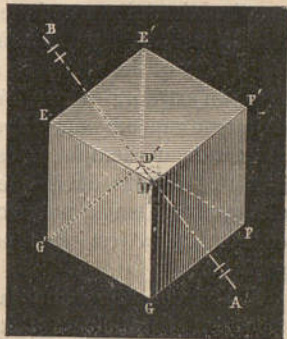


Fig. 346. — Cristal de spath d'Islande.

Si l'on reçoit sur un cristal de spath un rayon lumineux, ce rayon se bifurque généralement en pénétrant dans le cristal et à un seul rayon incident correspondent deux rayons réfractés qui se propagent dans le cristal avec des vitesses généralement différentes. La direction de ces rayons varie du reste suivant la direction du rayon incident par rapport au cristal. L'un des rayons réfractés obéit d'ailleurs aux lois ordinaires de la réfraction ; il est

en effet constamment situé dans le plan d'incidence et fait avec la normale au point d'incidence un angle dont la valeur est liée à celle de l'angle d'incidence par la loi des sinus. Ce rayon est dit *ordinaire*. L'autre rayon, appelé *extraordinaire*, ne suit généralement aucune des lois de Descartes; il n'est pas généralement dans le plan d'incidence, et l'angle qu'il fait avec la normale au point d'incidence n'est pas lié à l'angle d'incidence par une loi simple.

Il existe pourtant certaines positions du cristal pour lesquelles le rayon extraordinaire suit la première loi élémentaire de la réfraction; c'est lorsque le plan d'incidence coïncide avec une *section principale* du cristal. On désigne ainsi toute section contenant l'axe optique et une normale à l'une des faces du cristal, que cette face soit naturelle ou qu'elle ait été taillée artificiellement.

L'expérience montre en outre que, si le plan d'incidence est perpendiculaire à l'axe optique, le rayon extraordinaire suit les deux lois élémentaires de la réfraction. Toutefois, la valeur constante n' du rapport des sinus des angles d'incidence et de réfraction, pour le rayon extraordinaire, diffère de la valeur constante n que présente ce même rapport pour le rayon ordinaire. Dans certains cristaux, le quartz par exemple, n' est plus grand que n et le rayon extraordinaire est plus dévié que le rayon ordinaire; ces cristaux sont dits *positifs*. Dans d'autres cristaux au contraire, et le spath est de ce nombre, n' est plus petit que n ; ces cristaux sont appelés *negatifs*.

Si l'on considère une lame d'un cristal biréfringent dont une face soit parallèle à l'axe optique, un rayon normal à cette face n'est pas dédoublé en pénétrant dans le cristal; on peut cependant dire encore qu'il y a double réfraction, car il existe alors deux rayons, qui cheminent il est vrai suivant la même droite dans le cristal, mais dont les vitesses de propagation sont différentes, si bien que ces rayons se séparent à leur sortie du cristal, à moins que la face d'émergence ne soit parallèle à la face d'entrée.

Il existe toutefois, dans les cristaux biréfringents, une direction particulière, celle de l'axe optique, suivant laquelle il n'y a pas double réfraction. En effet, si l'on taille dans un cristal de spath une face artificielle perpendiculaire à l'axe cristallographique, l'expérience montre que tout rayon incident normal à cette face ne donne, à l'intérieur du cristal, qu'un seul rayon réfracté et qu'en outre il n'y a jamais qu'un seul rayon émergent.

Ajoutons que la théorie de la double réfraction conduit à une construction géométrique générale des deux rayons réfractés, construction assez complexe et que nous n'indiquerons pas.

Polarisation de la lumière par double réfraction. Loi de Malus. — Lorsqu'un rayon incident de lumière naturelle tombe normalement sur un cristal biréfringent, les deux rayons ordinaire et extraordinaire qui en résultent sont polarisés à angle droit; en d'autres termes, les vibrations de ces deux rayons s'effectuent dans deux plans perpendiculaires entre eux. Si l'on analyse en effet, avec un miroir noir, les deux rayons ordinaire et extraordinaire, on trouve que les vibrations du premier s'effectuent dans un plan perpendiculaire à la section principale du cristal et celles du second dans le plan même de cette section.

On peut se rendre compte de la double réfraction ainsi que de la polarisation de la lumière qui a traversé un cristal biréfringent par les considérations suivantes.

Supposons que le plan de la figure 347 soit une face naturelle ou artificielle du cristal et soit M le point où tombe, normalement à cette face, un rayon incident de lumière naturelle dont les vibrations s'effectuent, au moment considéré, suivant VV' par exemple; soient en outre SS' et PP' les traces, sur la figure, du plan de la section principale menée par M et du plan perpendiculaire à cette section. Tout se passe comme si, à son entrée dans le cristal, la vibration incidente était décomposée, d'après la règle du parallélogramme, en deux autres vibrations dirigées l'une suivant PP' l'autre suivant SS' et dont les vitesses de propagation dans le cristal seraient différentes, ce qui entraîne d'ailleurs la division du rayon

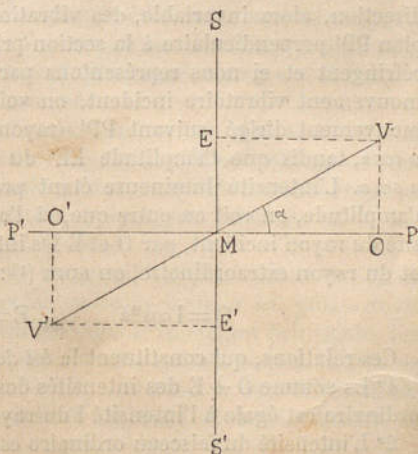


Fig. 347. — Décomposition d'une vibration incidente par un cristal biréfringent.

incident en deux rayons réfractés de directions différentes. Le rayon dont les vibrations s'effectuent suivant PP' constitue alors le rayon ordinaire, tandis que celui dont les vibrations sont parallèles à SS' forme le rayon extraordinaire.

Ceci posé, considérons successivement les deux cas dans lesquels la lumière incidente est constituée par de la lumière naturelle ou polarisée, c'est-à-dire les deux cas dans lesquels le cristal biréfringent fonctionne comme polariseur ou comme analyseur.

Lorsque la lumière incidente est naturelle, les vibrations qui arrivent en M se font, d'après ce que nous avons dit plus haut (§ 574), dans des azimuts variables après chaque intervalle de temps infiniment petit. Par suite, la somme des vibrations composantes suivant PP' ou SS' , pendant un temps même très court mais de grandeur finie, aura même valeur pour ces deux directions, ce qui veut dire que les intensités lumineuses des deux rayons ordinaire et extraordinaire seront égales entre elles.

Il n'en est pas de même lorsque la lumière incidente est polarisée. Si, en effet, nous désignons par α l'angle VMP que la direction, alors invariable, des vibrations incidentes fait avec le plan PP' perpendiculaire à la section principale SS' du cristal biréfringent et si nous représentons par $VV' = a$ l'amplitude du mouvement vibratoire incident, on voit que l'amplitude OO' du mouvement dirigé suivant PP' (rayon ordinaire) sera égale à $a \cos \alpha$, tandis que l'amplitude EE' du rayon extraordinaire sera $a \sin \alpha$. L'intensité lumineuse étant proportionnelle au carré de l'amplitude, on voit en outre que, si l'on représente par I l'intensité du rayon incident, par O et E les intensités du rayon ordinaire et du rayon extraordinaire, on aura (1) :

$$O = I \cos^2 \alpha \qquad E = I \sin^2 \alpha. \qquad (1)$$

Ces relations, qui constituent la *loi de Malus* montrent que :

1° La somme $O + E$ des intensités des rayons ordinaire et extraordinaire est égale à l'intensité I du rayon incident ;

2° L'intensité du faisceau ordinaire est d'autant plus faible que α est plus voisin de 90° , tandis que celle du rayon extraordinaire diminue à mesure que α s'approche de 0° ;

(1) On néglige ici les pertes qui peuvent provenir de la réflexion du rayon sur la face d'entrée de l'analyseur et l'on suppose implicitement que la substance de l'analyseur n'exerce aucune action absorbante sur la lumière.

3° Pour $\alpha = 45$, l'intensité du rayon ordinaire est égale à celle du rayon extraordinaire;

4° Lorsque $\alpha = 0$, le rayon extraordinaire est éteint et l'intensité du rayon ordinaire, alors seul transmis, est égale à celle du rayon incident; si $\alpha = 90$ c'est au contraire le rayon ordinaire qui est éteint, et l'intensité du rayon extraordinaire est alors égale à celle du rayon incident.

Il est facile de vérifier par l'expérience la plupart de ces conséquences. Il suffit pour cela de recevoir un faisceau de lumière normalement sur un cristal biréfringent et de faire tourner le cristal autour de l'axe du faisceau, ce qui fait varier l'angle que nous avons représenté par α . On constate ainsi que, si la lumière incidente est naturelle, le faisceau incident donne toujours naissance, quelle que soit l'orientation de la section principale du cristal à deux faisceaux réfractés d'intensités toujours égales. Si la lumière incidente est polarisée, la rotation du cristal détermine, dans le faisceau ordinaire et dans le faisceau extraordinaire, les variations d'intensité que nous avons déduites de la loi de Malus.

L'examen d'un faisceau de lumière avec un prisme biréfringent permet donc, grâce à la constance ou à la variation des intensités des rayons ordinaire et extraordinaire, de reconnaître si la lumière incidente est naturelle ou polarisée.

579. **Prisme de Nicol. Tourmaline.** — La présence de deux rayons réfractés, lorsqu'on fait usage d'un prisme biréfringent pour polariser ou analyser la lumière, est souvent très gênante; mais on peut se débarrasser de l'un des deux rayons réfractés en faisant usage du prisme de Nicol par exemple.

Ce prisme est constitué par un cristal de spath taillé d'une façon spéciale, sur laquelle nous ne pouvons insister ici, puis scié en deux suivant un plan perpendiculaire à la section principale. Les deux moitiés ainsi obtenues sont ensuite réunies et collées avec du baume de Canada dont l'indice de réfraction a une valeur intermédiaire entre celles des indices ordinaire et extraordinaire du spath.

La figure 348 représente, en coupe, un prisme de Nicol dont les deux parties sont réunies suivant DD' .

Lorsqu'un rayon de lumière tombe suivant LI sur un pareil prisme, dont la section principale est $GDG'D'$, ce rayon se bifurque et donne, d'une part un rayon extraordinaire IR_e , d'autre part un rayon ordinaire IR_o , plus dévié que le précédent, car, pour le spath,

l'indice ordinaire est plus grand que l'indice extraordinaire. Or les modifications que l'on a fait subir au prisme de spath sont telles que, grâce à la présence du baume de Canada interposé en DD' et dont l'indice est inférieur à celui du rayon ordinaire, ce rayon subit en K la réflexion totale et est renvoyé vers la paroi noire

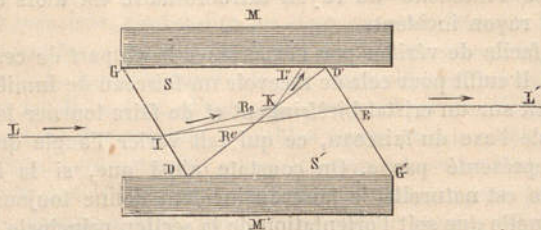


Fig. 348. — Coupe longitudinale d'un prisme de Nicol.

de la monture M qui l'absorbe en L' . Quant au rayon extraordinaire, il continue au contraire sa route et émerge suivant EL' , parallèlement à la direction du rayon incident.

Un Nicol ne laisse donc passer que le rayon extraordinaire ; par conséquent le seul rayon transmis est polarisé de telle sorte que ses vibrations s'effectuent dans le plan de la section principale.

Lors donc que l'on voudra analyser, avec un prisme de Nicol, un faisceau de lumière, il suffira de recevoir ce faisceau sur ce prisme et de faire tourner celui-ci autour de la direction du faisceau comme axe. Si, pendant cette rotation, le faisceau transmis ne subit aucune variation d'intensité, cela veut dire que le faisceau incident est constitué par de la lumière naturelle ⁽¹⁾. Si, au contraire, l'intensité varie, la lumière incidente est polarisée et sa polarisation est complète ou partielle suivant que l'on peut obtenir ou non l'extinction complète du faisceau transmis par l'analyseur. De plus, la direction des vibrations incidentes est perpendiculaire à la direction que présente la section principale au moment où le faisceau transmis est éteint ou lorsqu'il possède son minimum d'éclat.

Certains cristaux biréfringents jouissent de la propriété d'éteindre naturellement, lorsqu'on les considère sous une épaisseur suffisante, l'un des deux rayons réfractés. De ce nombre est la *tourmaline*

⁽¹⁾ Nous admettons ici implicitement que le faisceau incident est constitué soit par de la lumière naturelle soit par de la lumière polarisée rectilignement.

line, qui cristallise en prisme à six pans ordinairement colorés en vert ou en brun et dont l'axe optique est parallèle aux arêtes du prisme. Ces cristaux, lorsqu'ils ont une épaisseur convenable, absorbent complètement le rayon ordinaire et ne transmettent que l'extraordinaire. Une lame de tourmaline taillée parallèlement à l'axe constitue donc à volonté un polariseur ou un analyseur fort commode, dont le seul inconvénient est de colorer la lumière transmise.

CHAPITRE IV

POLARISATION CHROMATIQUE

580. **Description des phénomènes.** — Les phénomènes de polarisation chromatique prennent naissance lorsqu'un faisceau de lumière parallèle polarisée par un nicol par exemple, après avoir traversé une lame mince biréfringente dont les faces sont parallèles à son axe optique, est analysé au moyen d'un Nicol ou d'un cristal naturel de spath.

Avec un cristal de spath qui permet d'en faire une étude plus complète, l'aspect des phénomènes est le suivant.

Supposons d'abord que la section principale de l'analyseur soit perpendiculaire à celle du polariseur ; on sait que, dans ce cas, l'image extraordinaire est éteinte et l'ordinaire transmise seule. Les choses ainsi disposées, interposons entre les deux prismes une lame biréfringente suffisamment mince, taillée parallèlement à l'axe et placée de telle sorte qu'elle reçoive normalement la lumière. On observe dans ces conditions, soit une seule image blanche, comme avant l'interposition de la lame, soit deux images colorées dont les teintes, qui dépendent de l'épaisseur et de la substance de la lame, sont toujours complémentaires, car si l'on fait en sorte que ces images empiètent l'une sur l'autre la partie commune est constamment blanche.

Lorsque l'angle α que fait la section principale de la lame avec celle de l'analyseur est égal à 45° , on obtient deux images dont les couleurs présentent le maximum d'éclat ; si l'on fait alors tourner la lame de façon que l'angle α des deux sections principales devienne plus grand ou plus petit que 45° , les couleurs des deux images pâlissent sans changer de nuance, elles se lavent de blanc ; au moment où α est égal à 0° ou à 90° , il n'y a plus qu'une

image dont la lumière constituante est blanche. Pour une rotation encore plus grande de la lame biréfringente, on observe de nouveau les deux images colorées déjà décrites.

Lorsque la section principale de l'analyseur est parallèle à celle du polariseur, les phénomènes ne diffèrent des précédents qu'en ce qu'il y a transposition dans la couleur de chaque image.

Si, la lame étant fixe et sa section principale n'étant ni parallèle ni perpendiculaire à celle du polariseur, on fait tourner l'analyseur, les phénomènes sont un peu plus compliqués. On a constamment dans ce cas deux images; ces deux images sont blanches lorsque l'angle α de la section principale de l'analyseur avec la section principale de la lame est égal à 0° ou à 90° , mais les intensités de ces deux images ne sont alors égales que si, à ce moment, la section principale de la lame fait avec celle du polariseur un angle égal à 45° . Lorsque les sections principales de la lame et de l'analyseur ne sont ni parallèles ni perpendiculaires, les deux images présentent deux couleurs complémentaires plus ou moins lavées de blanc, suivant la position de l'analyseur. De plus ces couleurs passent d'une image à l'autre chaque fois que, pendant la rotation de l'analyseur, on dépasse l'une des positions pour lesquelles α est égal à 0° ou à 90° , c'est-à-dire pour lesquelles les deux images sont blanches.

Enfin, dans le cas où la section principale de la lame est parallèle ou perpendiculaire à celle du polariseur, on a tantôt une image, tantôt deux images, suivant l'orientation de l'analyseur; mais ces images ne sont jamais colorées.

Donc, en résumé, pour une même lame traversée normalement par la lumière, une même image ne peut jamais présenter que deux couleurs complémentaires; ces couleurs sont seulement plus ou moins lavées de blanc suivant l'orientation relative du polariseur, de la lame biréfringente et de l'analyseur. Les couleurs varient du reste avec l'épaisseur et avec la nature de la lame. On peut également faire changer les couleurs, pour une même lame, en inclinant plus ou moins celle-ci par rapport aux rayons incidents.

581. Principe de la théorie de la polarisation chromatique. — Fresnel a donné de tous ces phénomènes une théorie très complète dont nous ne pouvons exposer ici que le principe.

Lorsque la lumière polarisée, que nous supposons vibrer suivant PP' (fig. 349), rencontre normalement la lame biréfringente dont la section principale est dirigée suivant XX' , par exemple,

chaque vibration se décompose en deux autres dirigées l'une suivant XX' (rayon extraordinaire), l'autre suivant YY' (rayon ordinaire). Ces deux rayons, polarisés à angle droit, cheminent d'ailleurs suivant la même direction (§ 578); toutefois la vitesse de propagation du rayon ordinaire, à travers la lame biréfringente, diffère de celle du rayon extraordinaire; en conséquence, l'un de ces rayons présentera sur l'autre, à la sortie de la lame, un certain retard qui, pour une même lame, dépend de l'épaisseur de celle-ci; mais ces rayons ne peuvent interférer, car les plans de leurs vibrations sont rectangulaires.

Ces deux rayons, qui vibrent l'un suivant XX' , l'autre suivant YY' , tombent en cet état sur l'analyseur dont nous supposons la section principale dirigée suivant SS' .

Chacune des vibrations XX' , YY' est alors décomposée en deux autres suivant SS' (rayon extraordinaire fourni par l'analyseur) et suivant PP' (rayon ordinaire fourni par ce même analyseur). Chacune des vibrations résultantes, qui s'effectuent suivant SS' et PP' , provient donc, par parties, des vibrations des rayons ordinaire et extraordinaire auxquels a donné lieu le passage de la lumière à travers la lame mince, vibrations qui, ainsi que nous l'avons fait remarquer, sont en retard l'une par rapport à l'autre. On conçoit dès lors que, dans les rayons ordinaire et extraordinaire fournis par l'analyseur, telle ou telle lumière simple interfère partiellement, c'est-à-dire soit plus ou moins complètement éteinte; telle est l'origine de l'apparition des couleurs dans les deux faisceaux transmis au delà de l'analyseur.

582. **Autres phénomènes de polarisation chromatique.** — L'uniformité de coloration que l'on observe dans le cas simple considéré ci-dessus n'existe plus si, au lieu d'opérer en lumière parallèle, on emploie de la lumière convergente ou divergente; l'image transmise par l'analyseur que, pour simplifier, nous supposons maintenant être un Nicol, présente une série de courbes colorées, véritables franges d'interférences, dont la forme dépend du reste de la direction suivant laquelle le cristal a été taillé.

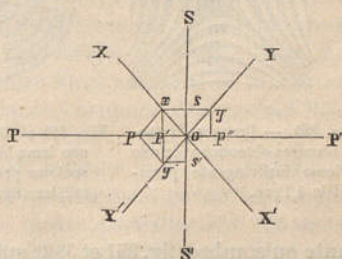


Fig. 349. — Théorie de la polarisation chromatique.

Dans le cas d'une lame parallèle à l'axe, les franges ont sensiblement la forme d'hyperboles (fig. 350). On obtient également des franges avec une lame perpendiculaire à l'axe, mais ces franges ont alors la forme d'anneaux concentriques coupés par une croix bril-

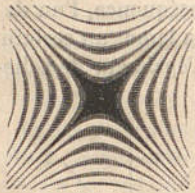


Fig. 350. — Franges d'interférences obtenues avec une lame biréfringente parallèle à l'axe.

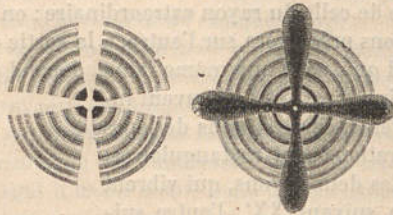


Fig. 351 et 352. — Franges d'interférences obtenues avec une lame biréfringente perpendiculaire à l'axe; fig. 351, sections principales du polariseur et de l'analyseur parallèles; fig. 352, sections principales perpendiculaires).

lante ou sombre (fig. 351 et 352), suivant que les sections principales de l'analyseur et du polariseur sont parallèles ou perpendiculaires entre elles.

Enfin on observe encore des franges d'interférences, de forme d'ailleurs variable, avec les cristaux à deux axes et avec un grand nombre de milieux transparents qui ne sont pas cristallisés, mais qui présentent, soit à cause de leur structure (corps organiques stratifiés), soit à cause des actions auxquelles ils sont ou ont été soumis (verre comprimé ou trempé), des élasticités différentes dans les diverses directions et qui possèdent par suite la double réfraction.

583. Applications. Microscope polarisant. — Les divers phénomènes de polarisation chromatique constituent des procédés très sensibles pour reconnaître, dans un faisceau de lumière, de minimes proportions de lumière polarisée. Il suffit pour cela de recevoir le faisceau à analyser sur une lame biréfringente et sur un Nicol convenablement orienté; l'apparition de couleurs ou de franges démontre qu'il existe dans le faisceau de la lumière polarisée. Les *polariscopes* basés sur ce principe sont d'ailleurs disposés de façon à permettre de déterminer la direction du plan de vibration de cette lumière polarisée.

L'action, sur la lumière polarisée, des lames minces taillées parallèlement à leur axe, a été utilisée dans la construction d'un ins-

trument destiné à faciliter le diagnostic du daltonisme, ou mieux de la dyschromatopsie.

Les phénomènes de polarisation chromatique, par ce fait qu'ils sont dus à la double réfraction, permettent de décèler cette double réfraction dans une foule de substances (cristaux et corps organisés microscopiques par exemple) dans lesquelles il serait impossible de l'observer directement ; ces phénomènes peuvent par suite être utilisés dans bien des cas pour reconnaître la nature de certains corps. Il est d'ailleurs nécessaire, à cause de la faible dimension des corps à examiner, d'avoir alors recours au *microscope polarisant* ; on appelle ainsi un microscope ordinaire, muni, au-dessous de la platine, d'un premier Nicol qui polarise la lumière réfléchiée par le miroir et, au niveau de l'oculaire, d'un second Nicol faisant office d'analyseur.

Le Nicol polariseur doit pouvoir tourner dans sa monture, et doit être éclairé par de la lumière sensiblement parallèle, afin que l'image ordinaire ne puisse être même partiellement transmise dans le microscope ; aussi doit-on faire usage du miroir plan pour réfléchir la lumière des nuées ; la préparation est, dans ces conditions, peu éclairée, mais l'on peut remédier à cet inconvénient en disposant entre le polariseur et la préparation une lentille à court foyer.

L'analyseur est généralement placé au-dessus de l'oculaire, mais il est bon de faire usage alors d'un oculaire spécial muni de son Nicol ; parfois au contraire l'analyseur est placé entre l'objectif et l'oculaire. Quoi qu'il en soit, l'analyseur doit toujours être mobile autour de l'axe du microscope, de façon que l'on puisse donner à sa section principale telle orientation que l'on désire ; en outre une graduation doit permettre d'apprécier l'angle que la section principale de l'analyseur fait à chaque instant avec celle du polariseur. Enfin, il est commode, afin de pouvoir donner à l'objet diverses orientations, de faire usage d'un microscope à platine tournante. Ajoutons encore que l'on emploie souvent, pour colorer le champ, des lames minces biréfringentes dites *lames sensibles* ; ces lames sont généralement disposées immédiatement au-dessous de l'analyseur et sont mobiles comme lui autour de l'axe du microscope.

Les grains de fécule, lorsqu'ils sont examinés avec le microscope polarisant, apparaissent avec une croix noire dont les branches se croisent au niveau du hile, fait qui peut être utilisé pour distin-

guer la fécule des corps qui peuvent lui être mélangés frauduleusement (A. Moitessier).

La cornée, le cristallin, surtout lorsqu'il commence à perdre sa transparence, le tissu élastique, les tendons, le tissu osseux, certains éléments constituant de la fibrille des muscles striés, les ongles, les cheveux, donnent de même naissance à des phénomènes analogues et sont donc doués, d'ailleurs à des degrés divers, du pouvoir biréfringent.

CHAPITRE V

POLARISATION ROTATOIRE

584. Action du quartz sur la direction des vibrations lumineuses.

— Il résulte de ce que nous avons vu (§ 579) que si l'on fait tomber un faisceau de rayons parallèles et monochromatiques sur deux prismes de Nicol, disposés à la suite l'un de l'autre de telle sorte que leurs sections principales soient perpendiculaires entre elles, aucune portion de lumière n'est transmise au delà du second Nicol. Il en est généralement de même si l'on place entre les deux Nicols, normalement au faisceau parallèle, une lame d'un cristal biréfringent dont les faces soient parallèles entre elles et *perpendiculaires* à l'axe optique du cristal.

Il existe cependant des corps, le quartz par exemple, qui, placés sous forme de lame dans les conditions que nous venons d'indiquer, jouissent de la propriété de faire reparaitre la lumière éteinte par l'analyseur; mais on peut obtenir de nouveau l'extinction de cette lumière en faisant tourner la section principale du Nicol analyseur d'un angle dont la grandeur dépend de diverses causes indiquées ci-dessous.

Cette propriété du quartz est en opposition avec les lois que nous avons déjà fait connaître à propos de la double réfraction. Tous les rayons, traversant normalement la lame, sont en effet dirigés parallèlement à l'axe optique et la direction de leur plan de vibration se confond toujours avec une section principale de la lame; ces rayons ne doivent donc subir aucun dédoublement et ne devraient, semble-t-il, éprouver aucune modification par leur passage à travers la lame.

Nous ne pouvons entrer ici dans l'explication que Fresnel a donnée de ce nouveau phénomène; nous nous contenterons de

faire remarquer que le résultat de l'expérience dont vient d'être question se conçoit immédiatement, si l'on admet que la lame de quartz, taillée perpendiculairement à son axe optique, a la propriété de dévier la direction rectiligne des vibrations incidentes d'un certain angle, mesuré d'ailleurs par la rotation qu'il faut faire subir au nicol analyseur pour rétablir l'extinction; de là le nom de *polarisation rotatoire* donné aux phénomènes étudiés dans le présent Chapitre. C'est cette hypothèse, à laquelle Fresnel a substitué une théorie établissant la nature du phénomène, que nous prendrons pour guide dans ce qui va suivre.

585. **Lois de la polarisation rotatoire.** — Un certain nombre de corps jouissent de la même propriété que le quartz; on les appelle *actifs*. Les corps qui sont sans action sur la direction du plan de vibration sont dits *inactifs*.

On appelle *pouvoir rotatoire* d'un corps l'angle dont tourne le plan de vibration de la lumière, lorsque celle-ci traverse une épaisseur de 1 millim. du corps.

Les phénomènes de polarisation rotatoire ont été découverts par Arago et étudiés par Biot, qui en a formulé les lois.

1° Pour une même substance, la rotation du plan de vibration d'une même radiation est proportionnelle à l'épaisseur de la lame traversée.

2° Pour un observateur placé de manière à faire face à l'arrivée des rayons lumineux, certaines substances font tourner le plan de vibration de la lumière vers la droite (sens du mouvement des aiguilles d'une montre), d'autres font tourner ce même plan vers la gauche (sens inverse du précédent). Les premières sont *dextrogyres*, et la rotation qu'elles produisent est caractérisée par le signe +; les secondes sont *lévogyres* et la rotation qu'elles produisent est caractérisée par le signe —.

Le sens de la rotation varie non seulement d'une substance à l'autre, mais fréquemment aussi, pour un même corps, suivant l'échantillon. Cette particularité est liée à certaines modifications de forme cristalline que ces échantillons présentent. C'est ainsi que certains cristaux de quartz sont dextrogyres, tandis que d'autres sont lévogyres; pour la même épaisseur de chacune de ces variétés, le déplacement angulaire du plan de vibration a d'ailleurs la même valeur absolue.

3° Quand on superpose plusieurs lames de diverses substances actives, la rotation totale due à l'ensemble de ces lames est égale

à la somme algébrique des rotations propres à chacune d'elles.

4^o La rotation produite par une même lame varie avec la réfrangibilité, c'est-à-dire avec la couleur, de la lumière monochromatique qui la traverse ; elle serait, d'après Biot, proportionnelle au carré de l'indice, ou inversement proportionnelle au carré de la longueur d'onde de la lumière monochromatique considérée. Broch, Wiedemann, Arndsten et Gernez ont démontré que cette relation n'était qu'approchée et que le degré de l'approximation différerait suivant la nature de la substance examinée.

586. Aspect des phénomènes dans la lumière incidente blanche.

— Cette dernière loi permet de prévoir ce qui se passe lorsque, au lieu d'opérer en lumière homogène, comme nous l'avons supposé ci-dessus, on emploie une lumière composée, la lumière blanche par exemple.

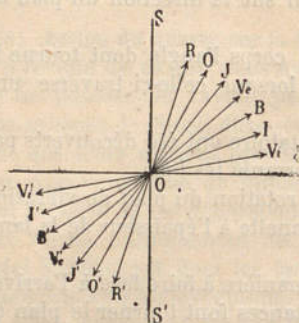


Fig. 353. — Dispersion des plans de vibration par une lame de quartz perpendiculaire à l'axe.

Soit, en effet, SS' (fig. 353) la direction commune suivant laquelle s'effectuent les vibrations des diverses radiations simples qui constituent la lumière blanche polarisée, à son entrée dans une lame de quartz perpendiculaire à l'axe et disposée normalement à la direction de la lumière. Sous l'action de cette lame, les plans de vibration sont inégalement déviés pour les diverses radiations,

ils subissent une véritable dispersion ; l'expérience montre par exemple que, pour une lame de quartz de 2^{mm} d'épaisseur, le plan de vibration du rouge extrême subit une rotation de 35° et celui du violet extrême une rotation de 88°. Les directions des vibrations rouges et violettes ont par suite, dans le rayon considéré et à la sortie de la lame de quartz, les directions RR' et $V_i V_i'$, les vibrations des autres couleurs ayant des directions intermédiaires OO' , JJ' , $V_e V_e'$, BB' , II' .

Si nous recevons alors un rayon lumineux ainsi constitué sur un Nicol analyseur, celui-ci n'éteindra complètement que les radiations dont les vibrations s'effectuent perpendiculairement à sa section principale et laissera passer une proportion d'autant plus forte des autres radiations que la direction de celles-ci sera plus

voisine de celle de cette section principale. On comprend par suite que l'on ait toujours, quelle que soit la position de l'analyseur, un faisceau de lumière transmise et que cette lumière, n'ayant plus la même composition que la lumière incidente, soit colorée. La composition, et par suite la coloration de la lumière transmise dépendront d'ailleurs de la position de l'analyseur, puisqu'elles résultent, pour toute position de cet analyseur, de la coexistence, dans le faisceau transmis, des diverses radiations simples non éteintes. Ajoutons que, pour une même position du polariseur et de l'analyseur, la couleur de la lumière transmise dépend de l'épaisseur de la lame de quartz interposée.

587. **Teinte sensible.** — Parmi les diverses teintes que l'on observe avec une même lame lorsqu'on fait tourner l'analyseur, il en est une qui jouit de la propriété de changer très notablement de couleur pour de très faibles déplacements angulaires de l'analyseur. Pour cette raison, cette teinte a été désignée sous le nom de *teinte sensible* ou *teinte de passage*; elle est obtenue lorsque les rayons jaunes sont éteints, c'est-à-dire lorsque la section principale de l'analyseur est perpendiculaire à la direction des vibrations du jaune moyen dans la lumière qui a traversé la lame de quartz. La couleur de cette teinte sensible est un *bleu violacé* analogue à celui de la fleur de lin.

Le rapide et notable changement de coloration qui se produit dans la teinte sensible par une faible rotation de l'analyseur tient d'ailleurs à ce que la région du jaune moyen est la plus lumineuse du spectre.

La composition de la teinte sensible varie avec l'épaisseur du quartz qui sert à la produire. Elle reste toutefois sensiblement la même tant que cette épaisseur ne dépasse pas 5 millimètres.

Il importe de remarquer en outre que la teinte la plus sensible aux déplacements angulaires de l'analyseur n'est celle que nous venons d'indiquer que dans les cas où l'œil de l'observateur perçoit normalement les couleurs.

588. **Différenciation des phénomènes de polarisation rotatoire et de polarisation chromatique.** — Si, pour étudier les phénomènes de polarisation rotatoire, nous avons employé comme analyseur un prisme biréfringent au lieu d'un Nicol, nous aurions eu deux faisceaux transmis au lieu d'un, et ces deux faisceaux auraient constamment présenté, comme dans le cas de la polarisation chromatique, des couleurs complémentaires.

Mais lorsque ces couleurs sont dues à la polarisation rotatoire, elles passent, pour une rotation suffisante de l'analyseur, par une série très variée de teintes; au contraire, la rotation de l'analyseur n'a d'autre effet que de faire varier le degré de saturation des couleurs ou de les échanger l'une dans l'autre, lorsque l'apparition de ces couleurs constitue un phénomène de polarisation chromatique.

Ajoutons qu'une rotation de la lame biréfringente modifie l'apparence des phénomènes de polarisation chromatique, tandis qu'elle est sans influence sur les couleurs dues à la polarisation rotatoire.

589. **Différentes catégories de substances actives.** — Nous avons déjà dit qu'un grand nombre de substances, dites *actives*, jouissent des mêmes propriétés que le quartz. Les substances actives peuvent être rangées en trois catégories.

a. — Les unes, comme le quartz, le cinabre, le chlorate et le bromate de soude, etc., ne possèdent le pouvoir rotatoire qu'à l'état cristallisé et le perdent lorsqu'elles sont fondues ou dissoutes ou lorsqu'elles entrent en combinaison. Ces cristaux actifs appartiennent d'ailleurs, soit au système cubique (chlorate et bromate de soude, etc.), et ils présentent alors le pouvoir rotatoire dans toutes les directions, soit à un système autre que le système régulier (quartz, cinabre, etc.), et ils ne possèdent alors le pouvoir rotatoire que dans le sens de l'axe. Quel que soit le système auquel ils appartiennent, ces cristaux doués du pouvoir rotatoire présentent généralement une certaine dissymétrie, sur laquelle nous reviendrons dans le paragraphe suivant; le pouvoir rotatoire paraît donc pour les corps de cette catégorie, être lié à l'arrangement de leurs molécules.

b. — Un grand nombre de substances organiques, telles que le sucre de canne, la glucose, l'acide tartrique, l'essence de térébenthine, l'essence de citron, etc., possèdent au contraire la propriété de faire tourner le plan de polarisation lorsqu'elles sont à l'état amorphe, à l'état liquide ou en dissolution, ou encore à l'état de vapeurs. Ces composés présentent, en outre, le pouvoir rotatoire dans toutes les directions et ce pouvoir se retrouve dans la plupart de leurs dérivés; par contre, ces mêmes corps, lorsqu'ils sont à l'état cristallisé ne possèdent plus de pouvoir rotatoire; ce pouvoir paraît donc, dans cette catégorie de substances, être lié à la molécule même de la substance.

c. — Il existe un très petit nombre de substances (on n'en connaît guère que deux, le sulfate de strychnine et l'alun d'amylamine) qui jouissent du pouvoir rotatoire aussi bien à l'état liquide qu'à l'état cristallisé.

590. Relation entre le pouvoir rotatoire et la forme cristalline.

— Il résulte des travaux de Pasteur que les cristaux actifs, de même que les cristaux des substances moléculairement actives qui ne sont pas eux-mêmes actifs, présentent généralement une certaine dissymétrie désignée sous le nom d'*hémiedrie non superposable* ou d'*éanthiomorphie*. Ces cristaux présentent, sur leurs sommets ou sur leurs arêtes, des facettes de modification qui n'affectent que la moitié des sommets ou des arêtes qu'elles devraient affecter d'après la loi de symétrie d'Haüy; ces facettes, en outre, sont situées à droite ou à gauche, ou paraissent plus inclinées vers la droite ou vers la gauche pour un observateur placé dans une position déterminée par rapport au cristal. On dit, suivant le cas, que le cristal est *hémiedre droit* ou *hémiedre gauche*. Deux cristaux identiques qui ne diffèrent que par le sens de leur hémiedrie peuvent être regardés comme l'image l'un de l'autre dans un miroir plan.

L'expérience montre que le sens de la rotation imprimée au plan de polarisation est lié au sens de l'hémiedrie. C'est ainsi que le quartz dextrogyre est hémiedre à droite, et le quartz lévogyre hémiedre à gauche.

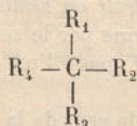
591. Relation entre le pouvoir rotatoire et la constitution des corps. — C'est à Pasteur que revient l'honneur d'avoir découvert, à la suite d'observations sur le tartrate racémique double de sodium et d'ammonium, cette relation, qui a été confirmée depuis par de très nombreux exemples sans qu'aucune exception ait pu valablement être objectée, et qui a conduit simultanément Lebel et Van T' Hoff à poser les bases de la *Stéréochimie* ou groupement des atomes dans l'espace, dont Pasteur avait très nettement indiqué la nécessité dans les termes suivants :

« Les atomes de l'acide tartrique droit sont-ils groupés suivant un hélice dextrorsum, ou placés au sommet d'un tétraèdre régulier, ou placés suivant tel assemblage dissymétrique déterminé? Nous ne saurions répondre à cette question. Mais ce qui ne peut être l'objet d'aucun doute, c'est qu'il y a un groupement des atomes suivant un ordre dissymétrique à image non superposable. Ce qui n'est pas moins certain, c'est que les atomes de l'acide tar-

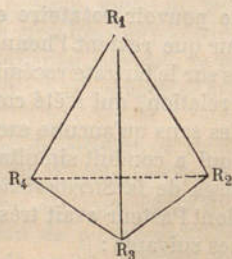
trique gauche réalisent précisément le groupe dissymétrique inverse de celui-ci. »

Telle a été l'origine première des remarquables travaux de Lebel et Van T' Hoff, qui guidés, le premier par le pouvoir rotatoire que possèdent certains corps gazeux, le second par la non existence d'isomères que le groupement des atomes dans un plan permettait de prévoir, ont été conduits simultanément, et indépendamment l'un de l'autre, à reprendre et à développer les conclusions de Pasteur et à créer ainsi ce que l'on a appelé la Stéréochimie. Nous résumerons brièvement les notions élémentaires de cette branche récente de la science qui se rattache directement aux questions physiques traitées dans le présent Chapitre.

592. **Représentation d'une molécule dans un plan et dans l'espace. Isomérisie.** — Lorsqu'un atome de carbone a ses quatre valences satisfaites par quatre radicaux monovalents R_1, R_2, R_3, R_4 , l'édifice moléculaire peut être représenté, soit par le symbole



qui suppose que tous les atomes de la molécule sont situés dans le même plan, soit par le symbole



qui suppose que les quatre radicaux R_1, R_2, R_3, R_4 occupent les sommets d'un tétraèdre régulier au centre duquel est situé l'atome de carbone.

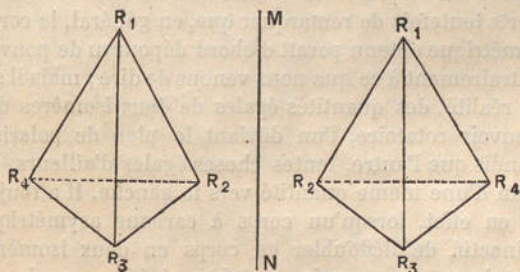
Il n'y a pas de raison *a priori* de préférer l'un de ces modes de groupement à l'autre et un choix rationnel ne peut être fait qu'en

contrôlant par l'expérience les conséquences auxquelles conduisent l'un et l'autre de ces modes de groupement.

Or si l'on adopte le premier symbole et que l'on considère successivement les cas des corps $C(R_1)^2(R_2)^2$, $C(R_1)^2R_2R_3$, $C(R_1)^2R_2$, on arrive à prévoir l'existence d'isomères qui n'ont jamais pu être obtenus.

Au contraire, si l'on adopte le symbole du tétraèdre et que l'on considère également les divers corps qui correspondent aux cas où les radicaux sont identiques ou différents, on est amené à conclure que le corps $CR_1R_2R_3R_4$ peut seul avoir un isomère. Dans tous les autres cas, en effet, le changement de place de deux radicaux conduit toujours à un nouveau groupement tétraédrique qui peut être exactement superposé au groupement primitif, de telle sorte que, les radicaux identiques coïncidant deux à deux, le nouveau groupement ne peut constituer un corps différent du premier par aucune propriété physique ou chimique.

Dans le cas du corps $CR_1R_2R_3R_4$, au contraire, si l'on change de place, par exemple, les radicaux R_2 et R_4 , on obtient les deux édifices



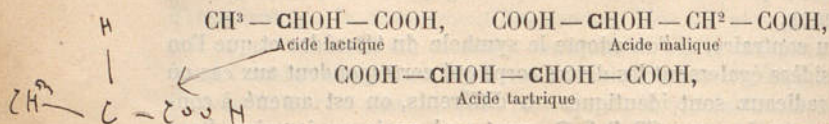
qu'il est impossible de superposer de manière à faire coïncider deux à deux tous les radicaux identiques et dont l'un peut être regardé comme l'image de l'autre obtenue par réflexion dans un miroir plan MN.

Or toutes les tentatives faites n'ont permis d'obtenir que *le seul isomère* des corps de la formule $CR_1R_2R_3R_4$; la représentation des corps dans l'espace doit donc être préférée comme conduisant seule à des conclusions conformes aux faits.

593. **Carbone asymétrique et pouvoir rotatoire.** — On appelle carbone *asymétrique* tout atome de carbone dont les quatre valences sont satisfaites par quatre radicaux différents, R_1, R_2, R_3, R_4 . Dans

ce qui va suivre, nous écrirons en caractères gras le symbole **C** du carbone, toutes les fois qu'il sera asymétrique.

L'observation montre que tous les corps qui contiennent un ou plusieurs carbones asymétriques, tels que :



etc., sont doués du pouvoir rotatoire, tandis que tous ceux, dans lesquels deux ou plusieurs des radicaux unis aux carbones sont identiques, n'exercent aucune action sur la lumière polarisée, ce qui est, par exemple, le cas de l'alcool propylique $\text{CH}^3 - \text{CH}^2 - \text{CH}^2\text{OH}$, du styrène ou du styrax $\text{C}^6\text{H}^5 - \text{CH} = \text{CH}^2$, etc.

L'observation montre encore que l'action rotatoire subsiste, disparaît ou apparaît dans les composés obtenus par transformation des corps précédents suivant que l'asymétrie subsiste, disparaît ou apparaît pour un ou plusieurs atomes de carbone.

Il importe toutefois de remarquer que, en général, le corps à carbone asymétrique obtenu paraît d'abord dépourvu de pouvoir rotatoire, contrairement à ce que nous venons de dire ; mais il se forme alors, en réalité, des quantités égales de deux isomères doués du même pouvoir rotatoire, l'un déviant le plan de polarisation à droite, tandis que l'autre, toutes choses égales d'ailleurs, dévie ce même plan d'une même quantité vers la gauche. Il a toujours été possible, en effet, lorsqu'un corps à carbone asymétrique s'est montré inactif, de dédoubler ce corps en deux isomères droit et gauche de même pouvoir rotatoire, si bien que la relation énoncée plus haut, entre l'existence d'un ou de plusieurs carbones asymétriques et celle du pouvoir rotatoire, ne souffre aucune exception.

Les corps à carbone asymétrique ainsi constitués par des quantités égales de deux isomères droit et gauche sont appelés *racémiques* ; c'est en particulier le cas de l'acide tartrique racémique, dédoublé par Pasteur en ses deux constituants par transformation de l'acide en sel sodico-ammoniacal.

594. Nombre d'isomères dans le cas où la molécule contient plusieurs **C** asymétriques. — En poursuivant, pour les corps à plusieurs carbones asymétriques, les déductions qui découlent de l'hypothèse d'une relation entre l'existence de carbone asymétrique

et le pouvoir rotatoire, on arrive à des conclusions qui, si elles n'ont pas encore été confirmées dans tous leurs détails par l'expérience, n'ont du moins été infirmées par aucun fait d'observation.

Soient, en effet, deux corps possédant chacun un carbone asymétrique et dont les pouvoirs rotatoires sont $+A$ et $+B$, le signe $+$ indiquant une rotation à droite par exemple; chacun de ces corps a, d'après ce qui précède, un isomère de pouvoir rotatoire $-A$ et $-B$.

Si le premier de ces corps, ainsi que son isomère, peut se combiner au second corps ou à son isomère, on voit immédiatement que l'on pourra obtenir les quatre combinaisons suivantes :

Combinaison de $+A$ avec $+B$	d'où résultera un corps à pouv. rot. =	$+A + B$
$+A$	$-B$	$-$
$-A$	$+B$	$-$
$-A$	$-B$	$-$
		$+A - B$
		$-A + B$
		$-A - B$

Ces quatre corps, les seuls qui puissent se former dans l'hypothèse sur laquelle repose le présent raisonnement, sont d'ailleurs isomères entre eux. Le premier et le quatrième ont, en outre, des pouvoirs rotatoires $+A + B$ et $-A - B$ égaux et de signes contraires, et il en est de même pour le second et le troisième dont les pouvoirs rotatoires sont $+A - B$ et $-A + B$.

Ajoutons que les quatre isomères dont nous venons de prévoir la formation peuvent former deux racémiques par la combinaison de :

et de

$+A + B$ avec $-A - B$
$+A - B$ avec $-A + B$.

Ces prévisions de la théorie sont confirmées par l'expérience; les deux acides maliques actifs, par exemple, forment avec les deux alcools amyliques quatre combinaisons qui satisfont aux conclusions précédentes.

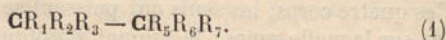
En appliquant le même raisonnement aux combinaisons possibles des composés $+A + B$, $+A - B$, $-A + B$ et $-A - B$ avec un troisième corps à carbone asymétrique et avec son isomère, il est facile de voir qu'il ne pourra se former que $8 = 2^3$ combinaisons d'ailleurs isomériques.

D'une manière générale, un corps contenant n carbones asymétriques ne peut donner que 2^n isomères dont les pouvoirs rotatoires

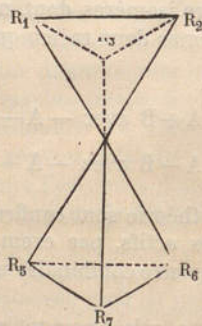
sont deux à deux égaux et de signes contraires. Sans doute, tous les isomères dont l'existence est ainsi prévue théoriquement n'ont pas encore été découverts, dans les cas où le nombre des carbones asymétriques est supérieur à deux, mais ce ne peut être là une objection contre la théorie que nous résumons.

595. **Cas de plusieurs carbones asymétriques réunis par une liaison simple.** — Au lieu de considérer, comme dans le paragraphe précédent, de simples combinaisons chimiques de deux corps de pouvoirs rotatoires A et B, soit un corps M à carbone asymétrique, dans lequel nous substituerons à l'un des radicaux un autre radical contenant lui-même un carbone asymétrique, de manière à former ce que l'on appelle en Chimie un *homologue supérieur* de M à liaison simple.

Si nous représentons le corps M, en donnant aux radicaux un ordre successif réel, par la formule $\text{C R}_1 \text{R}_2 \text{R}_3 \text{R}_4$, la substitution au radical R_4 d'un radical à carbone asymétrique donnera le corps :

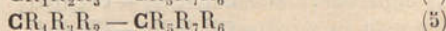
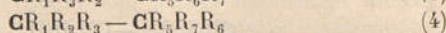
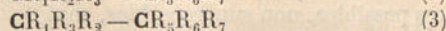
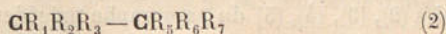


La représentation de ce corps dans l'espace consistera d'ailleurs en deux tétraèdres réguliers, opposés par le sommet, l'un de ces tétraèdres représentant le radical $\text{C R}_5 \text{R}_6 \text{R}_7$ à carbone asymétrique.



Or, si l'on intervertit de toutes les manières possibles, dans chacune des parties de la formule (1), l'ordre de succession des radicaux, et que l'on construise chaque fois le double tétraèdre représentatif du nouveau corps obtenu, on trouve que les seuls cas dans lesquels le double tétraèdre n'est pas superposable, radical

par radical, au double tétraèdre d'une autre combinaison, sont ceux qui correspondent aux formules :



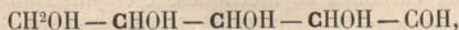
Donc, dans le cas d'un corps possédant deux carbones asymétriques à liaison simple, il ne peut exister que quatre isomères.

Il est d'ailleurs facile, par la considération des tétraèdres représentatifs, de s'assurer que les isomères (2) et (5) d'une part, (3) et (4) de l'autre sont opposables et non superposables, c'est-à-dire qu'ils doivent posséder des pouvoirs rotatoires égaux et de signes contraires.

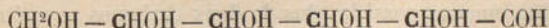
Ajoutons que l'on peut prévoir encore l'existence de deux racémiques résultant de la combinaison, molécule à molécule, des corps (2) et (5) d'une part, (3) et (4) de l'autre.

En généralisant le raisonnement précédent au cas de plusieurs atomes de carbone asymétrique à liaisons simples, on arrive encore à prévoir théoriquement un nombre d'isomères égal à 2^n , n étant le nombre des carbones asymétriques.

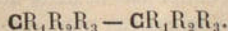
Les conclusions précédentes sont confirmées par l'expérience. Le bornéol, par exemple, qui possède deux carbones asymétriques à liaison simple, a fourni à Haller et Montgolfier quatre isomères conformément à la théorie. De même, on connaît les huit isomères de la formule



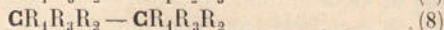
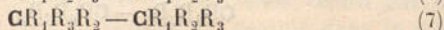
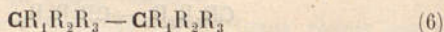
parmi lesquels se trouvent l'arabinose, le xylose et le ribose, et que l'on désigne sous le nom général de *pentoses*. Enfin Fischer a découvert 10 des 16 isomères, qui portent le nom général d'*hexoses*, auxquels la théorie permet d'attribuer la formule :



596. Cas où il y a symétrie dans la formule. — Il est intéressant de considérer le cas particulier des corps qui, possédant deux carbones asymétriques à liaison simple, ont une formule symétrique de la forme



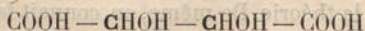
Il est encore facile de s'assurer, au moyen des tétraèdres représentatifs, ou en faisant $R_5 = R_1$, $R_6 = R_2$, $R_7 = R_3$, dans les formules (2), (3), (4), (5) du paragraphe précédent, que les seuls isomères possibles, non superposables, sont :



Si l'on construit les doubles tétraèdres de ces trois corps (6), (7) et (8), on voit immédiatement que les corps (6) et (8) sont opposables mais non superposables, qu'ils doivent, par suite, posséder des pouvoirs rotatoires égaux et de signes contraires $+A$ et $-A$, et que leur combinaison doit donner un racémique, corps inactif, mais dédoublable.

La considération du double tétraèdre du corps (7) montre de même que l'un de ces tétraèdres est l'image opposable mais non superposable de l'autre. Ce corps doit donc être inactif et se distinguer du racémique dont nous venons de parler, en ce qu'il n'est pas décomposable en deux corps actifs de pouvoirs rotatoires égaux et de signes contraires.

Ces conclusions sont exactement vérifiées par le mémorable travail effectué par Pasteur bien avant que la théorie qui y conduit, et que nous résumons dans ses points principaux, eût été établie. La formule de l'acide tartrique, en effet,



contient deux carbones asymétriques, est symétrique et rentre donc dans le cas actuellement étudié. Il doit par suite exister deux isomères actifs de pouvoirs rotatoires égaux et de signes contraires, un troisième isomère inactif et non dédoublable et un racémique, c'est-à-dire un inactif dédoublable; tous faits qui avaient été rigoureusement établis par Pasteur.

On traiterait de la même manière le cas où le corps, à formule symétrique encore, possède plus de deux carbones asymétriques. On trouve alors que, suivant qu'il existe trois ou quatre carbones asymétriques, par exemple, le nombre des isomères se réduit à 4 au lieu de $2^3 = 8$ dans le premier cas, et à 10 au lieu de $2^4 = 16$ dans le second, mais qu'il doit exister en même temps deux isomères inactifs dans le premier cas et deux aussi dans le second.

Un exemple de chacun de ces cas nous est donné par les acides

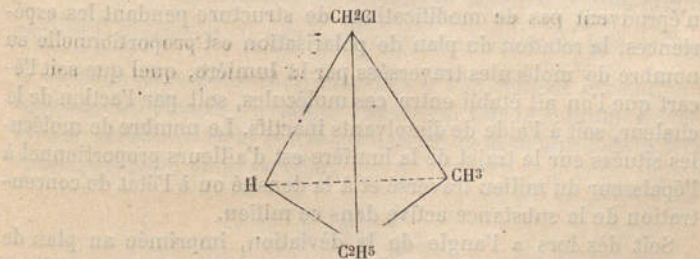
bibasiques qui correspondent aux pentoses (3 carbones asymétriques) et aux hexoses (4 carbones asymétriques). Or Fischer a pu préparer, dans chacun de ces cas, tous les isomères actifs ou inactifs indédoublables prévus par la théorie.

Les mêmes considérations sont encore applicables au cas où les deux carbones asymétriques d'une molécule symétrique elle-même sont séparés par un autre atome de carbone au lieu d'être directement reliés entre eux.

597. **Variation du pouvoir rotatoire avec la position du centre de gravité du tétraèdre.** — Il résulte de la théorie dont nous venons d'exposer les principes que le pouvoir rotatoire n'existe que si les radicaux monovalents qui satisfont aux quatre valences d'un atome de carbone sont différents. Or, si l'on attribue à chacun de ces radicaux un poids réel égal à la somme des poids des atomes qui le constituent, et que l'on cherche la position du centre de gravité du tétraèdre, on voit que ce centre, dans tous les corps à pouvoir rotatoire, est situé en dehors de chacun des six plans de symétrie du tétraèdre régulier. Cette remarque a conduit P. A. Guye à penser que le pouvoir rotatoire était lié à la position du centre de gravité en dehors de chacun des six plans de symétrie et que la valeur de ce pouvoir était d'autant plus grande ou plus petite que le centre de gravité était plus ou moins éloigné de l'un de ces plans.

Cette hypothèse conduit à des conséquences qui sont assez généralement vérifiées par l'expérience.

Soit, en effet, le chlorure d'amyle actif,



dans lequel le poids des radicaux est :

$$H=1, \quad CH^3=13, \quad C^2H^5=29, \quad CH^2Cl=49,5.$$

Si, dans le groupe CH^2Cl , on remplace Cl par d'autres radicaux

de telle sorte que le poids de ce groupe reste supérieur à celui des groupes H, C²H⁵ et CH³, le pouvoir rotatoire doit toujours conserver le même signe, car le centre de gravité du tétraèdre reste toujours alors d'un même côté, par rapport à un même plan de symétrie. Or Guye a obtenu quarante-trois produits de substitution satisfaisant à la condition précédente et qui tous ont été dextrogyres comme le chlorure d'amyle.

Nous avons dit, en outre, qu'il y a lieu de penser que la valeur du pouvoir rotatoire de ces diverses combinaisons doit être d'autant plus grande que le poids du groupe CH²Cl ou de celui qu'on lui substitue est lui-même plus grand, car le centre de gravité est alors plus éloigné du plan de symétrie. L'expérience a confirmé, en général, cette nouvelle déduction, mais quelques faits cependant paraissent l'infirmier. Guye, pour rendre compte de ces exceptions, admet que la distance des atomes n'est pas la même dans le groupe CH²Cl et dans ceux qu'on obtient par substitution d'un radical à Cl; or ces distances interatomiques intervenant pour déterminer la position du centre de gravité du groupe CH²Cl, et par suite celle de tout le tétraèdre, il est facile d'expliquer les exceptions par des variations de ces distances interatomiques.

598. **Pouvoir rotatoire moléculaire.** — Les phénomènes de polarisation que l'on observe dans les substances moléculairement actives sont régis, dans leur ensemble, par les lois énoncées plus haut (§ 585).

Biot a montré en outre que, lorsque le pouvoir rotatoire appartient aux molécules mêmes d'une substance et que ces molécules n'éprouvent pas de modifications de structure pendant les expériences, la rotation du plan de polarisation est proportionnelle au nombre de molécules traversées par la lumière, quel que soit l'écart que l'on ait établi entre ces molécules, soit par l'action de la chaleur, soit à l'aide de dissolvants inactifs. Le nombre de molécules situées sur le trajet de la lumière est d'ailleurs proportionnel à l'épaisseur du milieu traversé et à la densité ou à l'état de concentration de la substance active dans ce milieu.

Soit dès lors α l'angle de la déviation, imprimée au plan de vibration d'une radiation déterminée, par une épaisseur l d'une substance active dont la densité propre, dans l'état où elle se trouve au moment de l'expérience, est d ; on aura, d'après ce qui précède :

$$\alpha = \rho l d, \quad (1)$$

ρ étant une constante dont la signification physique se déduit de cette même égalité, dans laquelle on fait $l=1$ et $d=1$. On a, en effet, dans ce cas :

$$\alpha = \rho;$$

ρ est donc la déviation imprimée à la radiation considérée par une épaisseur 1 de la substance, lorsque celle-ci a été amenée à un état tel que sa densité propre d soit égale à l'unité. Biot a donné à ρ le nom de *pouvoir rotatoire moléculaire*.

Ce pouvoir rotatoire moléculaire devrait être constant pour une même substance et une même radiation si la loi énoncée plus haut, et dont la formule (1) est la traduction algébrique, était rigoureusement exacte. Mais cette loi n'est qu'approchée ; certains corps s'en écartent même notablement, ou plutôt les molécules des substances actives éprouvent presque toujours, sous l'influence de la chaleur ou des dissolvants inactifs, des modifications plus ou moins grandes de structure qui font plus ou moins varier le pouvoir rotatoire moléculaire. Ce pouvoir reste cependant sensiblement constant, entre d'assez grandes limites, pour un grand nombre de substances actives telles que le sucre de canne et le sucre de diabète.

On considère généralement le pouvoir rotatoire moléculaire relatif au jaune moyen.

Dans le cas particulier (cas qui intéresse plus spécialement le médecin et que nous étudierons seul ici) où il s'agit d'une substance active à pouvoir rotatoire moléculaire constant, dissoute dans un liquide inactif, d représente, dans la formule (1), la densité de la substance active au sein de la solution, c'est-à-dire le rapport $\frac{p}{v}$ du poids de la substance active au volume de la solution.

Il est facile de calculer cette densité d si l'on connaît la rotation α imprimée au plan de vibration, l'épaisseur l de la solution traversée par la lumière et le pouvoir rotatoire moléculaire ρ de la substance dissoute ; on a, en effet :

$$d = \frac{p}{v} = \frac{\alpha}{\rho l}.$$

On peut tirer de là la valeur du poids p de la substance active dissoute :

$$p = \frac{\alpha v}{\rho l}. \quad (2)$$

Les quantités v et l peuvent être évaluées par les méthodes ordinaires; il suffit donc, pour les corps dont le pouvoir rotatoire ρ est constant et connu, de mesurer α pour pouvoir déduire de la formule (2) le poids de substance active dissoute dans un volume déterminé de liquide inactif. On comprend toute l'importance qu'il y a pour le médecin à savoir effectuer cette mesure de α , puisqu'elle permettra, par exemple, de déterminer la quantité de sucre contenue dans une urine diabétique.

599. Polarimètres et Saccharimètres. — Les instruments destinés à évaluer l'angle dont tourne le plan de vibration de la lumière sous l'influence d'une substance active portent le nom de *polarimètres*.

Dans certains cas, au lieu d'évaluer directement cet angle, on annule la déviation du plan de vibration due à la substance active à l'aide d'une lame de quartz produisant une rotation égale et de sens inverse. De l'épaisseur qu'il faut donner à cette lame pour obtenir ce résultat, on peut déduire l'angle dont a tourné le plan de vibration et par suite la quantité de substance active contenue dans la solution examinée. Toutefois il faut alors, si l'on opère avec la lumière blanche, ce qui est le cas général, que la dispersion des plans de vibration par la substance active à doser soit sensiblement la même que la dispersion de ces mêmes plans par le quartz. C'est ce qui arrive, en particulier, pour les diverses espèces de sucre, et les instruments qui, construits sur le principe que nous venons d'indiquer, servent essentiellement au dosage des sucres ont été désignés sous le nom de *saccharimètres*.

Ces instruments ne peuvent pas servir pour doser l'acide tartrique, par exemple, dans une solution; en effet, cette substance, outre qu'elle n'a pas un pouvoir rotatoire moléculaire constant, ne disperse pas de la même manière que le quartz les plans de vibration des diverses couleurs simples.

Les divers modèles de saccharimètres et de polarimètres sont fort nombreux; nous nous bornerons à décrire ici les plus usités.

600. Saccharimètre de Soleil. — Le saccharimètre de Soleil est constitué, dans ses parties essentielles, par un Nicol polariseur N (fig. 354), une lame de quartz à deux rotations ou *biquartz* B d'une épaisseur de 3^{mm},77, un tube à liquide T, un *compensateur* CC' sur lequel nous reviendrons plus loin, un Nicol analyseur A et une lunette de Galilée G, qui permet à l'observateur de mettre au point pour la surface du biquartz.

Le polariseur et l'analyseur sont fixes et leurs sections principales sont parallèles. Le biquartz, représenté de champ en B et de face en B', se compose de deux demi-disques formés, l'un de quartz dextrogyre, l'autre de quartz lévogyre, taillés l'un et l'autre perpendiculairement à l'axe et ayant exactement la même épaisseur; ces deux demi-disques sont accolés par leur tranche diamétrale de façon à constituer un disque complet.

Le compensateur, imaginé par Soleil et Duboscq, comprend d'abord une lame à faces parallèles C de quartz dextrogyre taillé perpendiculairement à l'axe, puis le compensateur proprement dit C'

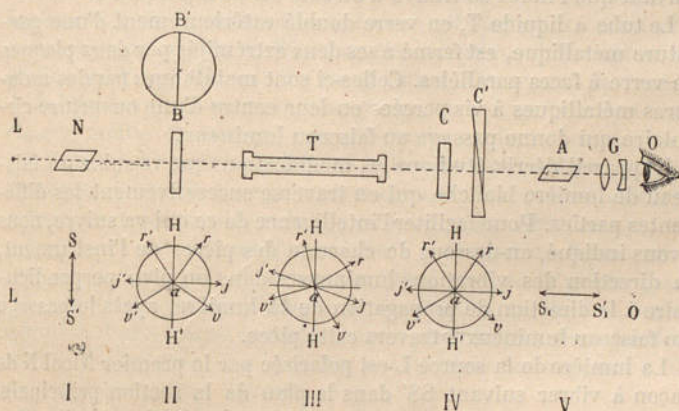


Fig. 354. — Théorie du saccharimètre de Soleil.

formé de deux lames prismatiques de quartz lévogyre; ces deux lames, qui ont chacune la forme d'un prisme rectangle très allongé, ont été taillées de façon que les faces qui constituent le grand côté de l'angle droit soient perpendiculaires à l'axe optique. Elles sont disposées de façon à pouvoir glisser l'une au-devant de l'autre et à constituer ainsi une lame résultante dont l'épaisseur est variable à volonté, mais dont les faces sont toujours parallèles (chaque prisme de quartz est du reste achromatisé par un prisme de verre de même angle et tourné en sens inverse). L'une des lames du compensateur C' est, en outre, munie d'un index qui se déplace devant une graduation portée par l'autre lame. Lorsque l'épaisseur du compensateur C' est égale à celle de la lame dextrogyre C (3^{mm}), l'index se trouve devant le 0 qui est au milieu de la graduation;

il est évident que, dans ces conditions, l'effet rotatoire de la lame dextrogyre étant exactement détruit par celui des lames lévogyres, l'action de l'ensemble du système C, C' sur la lumière polarisée est nulle. Il n'en sera plus de même si l'on fait glisser l'une devant l'autre les lames du compensateur ; l'effet de tout le système C, C' sera alors dextrogyre ou lévogyre, suivant que l'épaisseur de C' sera inférieure ou supérieure à celle de la lame C. La position de l'index devant les traits de la graduation indique du reste, en centièmes de millimètre, la différence d'épaisseur du compensateur et de la lame C ; cette différence est regardée comme positive ou négative suivant que l'index se trouve d'un côté ou de l'autre du 0.

Le tube à liquide T, en verre doublé extérieurement d'une garniture métallique, est fermé à ses deux extrémités par deux plaques de verre à faces parallèles. Celles-ci sont maintenues par des montures métalliques à vis percées en leur centre d'une ouverture circulaire qui donne passage au faisceau lumineux.

L'appareil décrit, étudions les modifications que va subir un faisceau de lumière blanche qui en traverse successivement les différentes parties. Pour faciliter l'intelligence de ce qui va suivre, nous avons indiqué, au-dessous de chacune des pièces de l'instrument, la direction des vibrations lumineuses dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation de la lumière, après le passage du faisceau lumineux à travers cette pièce.

La lumière de la source L est polarisée par le premier Nicol N de façon à vibrer suivant SS' dans le plan de la section principale. Elle traverse ensuite le biquartz qui fait tourner le plan de vibration de chaque radiation du même angle, mais en sens inverse dans chacune des moitiés du faisceau ; la rotation s'effectuera vers la droite pour la lumière qui aura traversé la partie dextrogyre, vers la gauche pour celle qui aura rencontré la moitié lévogyre. La valeur de l'angle de rotation dépendra du reste de la couleur de la radiation considérée et de l'épaisseur du biquartz. Cette épaisseur ($3^{\text{mm}}.77$) est d'ailleurs telle que le plan des vibrations de la lumière jaune tourne de 90° dans chacune des moitiés du faisceau. En somme donc, si l'on suppose, pour simplifier la figure, que la ligne de séparation HH' des deux moitiés du biquartz coïncide avec la section principale du polariseur, la direction des vibrations au delà du biquartz sera, pour le rouge extrême, parallèle à *ar* dans la moitié droite du faisceau et à *ar'* dans la moitié gauche ; pour le violet extrême, la direction des vibrations sera de même *av* à droite,

et av' à gauche. Pour les couleurs intermédiaires, les directions des plans de vibration seront de même symétriques par rapport à HH et comprises respectivement dans les angles rov , $r'av'$.

Supposons un moment que le tube T contienne un liquide inactif et que le compensateur soit au 0, c'est-à-dire que les deux parties lévogyre et dextrogyre C et C' détruisent mutuellement leurs effets. Les directions des vibrations des diverses lumières simples des deux moitiés du faisceau s'effectueront, après le passage à travers le compensateur, suivant les mêmes directions qu'en II à la sortie du biquartz (fig. 334, IV). Or la section principale de l'analyseur A, étant parallèle à celle du polariseur N, cette section est également inclinée sur les directions suivant lesquelles s'effectuent, dans les deux moitiés du faisceau, les vibrations d'une même radiation quelle qu'elle soit. La composition, et par suite la couleur de la lumière transmise par l'analyseur, sera donc la même dans chaque moitié du faisceau ; de plus cette couleur commune sera précisément la teinte sensible, si le liquide est incolore, puisque l'analyseur, en raison de son orientation, éteint complètement les vibrations dirigées suivant $S_1S'_1$, c'est-à-dire les vibrations jaunes.

Supposons maintenant que le tube T contienne un liquide actif dextrogyre. Ce liquide fera tourner à droite, et de la même quantité angulaire comme l'indique la figure 334 en III, le plan de vibration d'une même radiation, quelle qu'elle soit, dans les deux moitiés du faisceau. La symétrie qui existait par rapport à HH' sera en conséquence détruite.

Si donc rien n'est changé au compensateur, l'analyseur éteignant encore les vibrations parallèles à $S_1S'_1$, c'est, pour le cas de la figure, une couleur voisine du violet qui sera supprimée dans la moitié gauche du faisceau et une couleur voisine du rouge qui manquera dans la moitié droite ; la couleur de la moitié gauche du faisceau tirera donc sur le rouge, celle de la moitié droite sur le violet.

Il faudra, pour rétablir l'égalité de teinte, ramener le plan de vibration de chaque radiation à sa direction primitive (fig. 334, IV). On y parviendra en augmentant l'épaisseur de la partie lévogyre C' du compensateur, à condition toutefois que la substance active et le quartz imprimant aux plans de vibration des différentes couleurs des déviations qui soient entre elles dans le même rapport.

Connaissant la différence d'épaisseur qui existe, lorsque l'égalité de teinte est rétablie, entre l'ensemble des deux lames C' du com-

compensateur et la lame du quartz dextrogyre C, différence qui est indiquée par la position de l'index sur la graduation, il sera possible de calculer l'effet rotatoire α de la solution du tube T sur les vibrations jaunes par exemple; on déduira de là la quantité de substance active contenue dans la solution examinée.

Quand la substance active est du sucre, on arrive plus simplement au même résultat grâce aux considérations suivantes.

Les divisions de la graduation du compensateur correspondent, nous l'avons déjà dit, à une épaisseur de quartz de un centième de millimètre; elles constituent ce que l'on appelle un *degré saccharimétrique*. Si l'on détermine empiriquement la valeur en sucre du degré saccharimétrique dans des conditions bien déterminées, il sera facile de déduire du nombre de degrés saccharimétriques, trouvés pour une solution examinée dans les mêmes conditions, la quantité de sucre qu'elle renferme. On comprend du reste que l'on puisse déterminer facilement la valeur en sucre du degré saccharimétrique, en examinant une solution de titre connu et en cherchant le nombre de degrés dont il faut déplacer le compensateur pour rétablir l'égalité de teinte que cette solution a détruite. On a trouvé ainsi qu'une solution contenant 163^{gr}.50 de sucre de canne par litre, examinée sous une épaisseur de 20 centim., marque 100°; une solution de sucre de diabète de même titre marque seulement 73° dans les mêmes conditions. La valeur du degré saccharimétrique est donc de $\frac{163^{\text{gr}}.50}{100} = 1^{\text{gr}}.635$ pour le sucre de canne, de

$\frac{163^{\text{gr}}.50}{73} = 2^{\text{gr}}.239$ pour le sucre de diabète. Quand une solution de l'une de ces substances, examinée sous une épaisseur de 20 centim., marquera n degrés saccharimétriques, cela signifiera donc qu'elle contient, suivant le cas, $n \times 1^{\text{gr}}.635$ de sucre de canne, ou $n \times 2^{\text{gr}}.239$ de sucre de diabète par litre.

Producteur des teintes sensibles. — Nous avons dit que, par suite de l'épaisseur choisie pour le biquartz, la teinte commune des deux moitiés du faisceau était la teinte dite *sensible* lorsque, le tube à liquide étant vide ou contenant un liquide incolore inactif, le compensateur était au 0; il en est généralement de même lorsque l'action d'un liquide actif est compensée par un déplacement convenable des lames du compensateur. Cependant, si le liquide employé est suffisamment coloré, on obtient bien encore dans ces conditions l'égalité de teinte, mais non plus la teinte sensible.

D'un autre côté, la teinte que nous avons désignée sous le nom de teinte sensible n'est pas la plus sensible pour tous les observateurs.

Afin de permettre à chaque observateur de réaliser, dans tous les cas, la teinte la plus sensible pour ses yeux, Soleil et Duboscq ont disposé à l'une des extrémités du saccharimètre une lame de quartz taillée perpendiculairement à l'axe et un troisième prisme de Nicol; ce système constitue le *producteur des teintes sensibles*. Nous avons vu (§ 586) qu'un pareil système permettait de donner au faisceau lumineux qui le traverse une coloration qui dépend de l'orientation de la section principale du nicol. Lors donc qu'on a obtenu, comme nous l'avons déjà indiqué ci-dessus, l'égalité de teinte des deux moitiés du faisceau lumineux qui a traversé la substance active, une simple rotation du producteur des teintes suffit pour donner à la teinte uniforme du faisceau, et sans détruire cette uniformité, telle coloration que l'on désire. Chaque observateur pourra donc toujours réaliser ainsi la teinte qui est pour lui la plus sensible.

601. **Polarimètres à pénombre.** — L'emploi du saccharimètre de Soleil est basé sur l'appréciation de l'identité des teintes des deux moitiés d'un faisceau lumineux; or l'identité de teintes paraît, en général, être moins exactement appréciée qu'une égalité d'intensité lumineuse de deux plages voisines. De là la préférence souvent accordée aux polarimètres à *pénombre* sur le saccharimètre que nous venons de décrire.

Le polarimètre de Cornu et J. Duboscq et celui de Laurent, que nous allons décrire, sont des polarimètres à pénombre.

Ces instruments sont constitués, dans leurs parties essentielles, par un appareil polarisant, un tube à liquide et un nicol analyseur; la théorie générale est la même pour les deux, aussi l'exposerons-nous d'abord et décrirons-nous ensuite les particularités propres à chaque instrument.

Les deux moitiés d'un faisceau lumineux *monochromatique* de forme cylindrique sont, par un procédé différant dans chaque polarimètre, polarisées dans des plans distincts; les vibrations lumineuses, qui s'effectuent par exemple parallèlement à OV (fig. 335, I) dans la moitié droite, se font parallèlement à OV' dans la moitié gauche du faisceau.

L'angle VOV' , formé par les directions des plans de vibration dans les deux moitiés du faisceau, est tantôt fixe (polarimètre Cornu et J. Duboscq), tantôt variable au gré de l'observateur (polarimètre

Laurent). Quoi qu'il en soit, le plan de séparation des deux moitiés du faisceau est toujours dirigé suivant la bissectrice BB' de l'angle formé par les directions OV , OV' des vibrations dans ces deux moitiés.

Supposons que le faisceau, constitué comme nous venons de l'indiquer, arrive jusqu'à l'analyseur sans subir de modifications; la décomposition des vibrations incidentes suivant la section principale et suivant une direction normale à cette section, montre que les deux moitiés du faisceau transmis par cet analyseur ne pourront avoir même intensité lumineuse que si la section principale de l'analyseur est également inclinée sur les directions

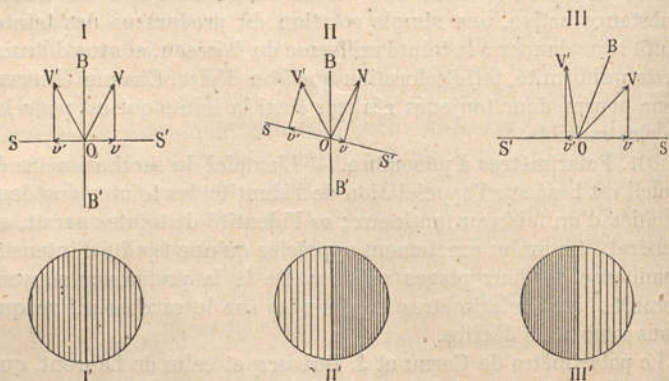


Fig. 355. — Théorie des polarimètres à pénombre.

OV , OV' des plans de vibration des deux moitiés du faisceau incident. Pour qu'il en soit ainsi, il faut et il suffit que cette section principale soit parallèle, ou perpendiculaire (fig. 355, I), à la bissectrice BB' de ces directions, car les composantes vibratoires Ov , Ov' suivant la direction de la section principale seront alors égales. L'intensité lumineuse uniforme (fig. 355, I') des deux moitiés du faisceau dépendra du reste de la valeur commune de l'angle que fera, dans chaque moitié du faisceau, la direction du plan de vibration avec la section principale de l'analyseur.

Supposons que cette section principale soit dirigée suivant SS' (fig. 355, I), perpendiculairement au plan de symétrie BB' ; la moindre rotation de l'analyseur (fig. 355, II), ou du plan de symétrie (fig. 355, III), suffira pour détruire l'égalité d'éclairement

(fig. 355, II' et III'), car les composantes vibratoires Ov, Ov' suivant la direction de la section principale SS' seront alors inégales entre elles.

Si nous plaçons, en avant de l'analyseur et sur le trajet du faisceau lumineux, une substance active, celle-ci fera tourner le plan de vibration de la lumière d'un même angle α dans les deux moitiés du faisceau (fig. 355, III). La bissectrice OB de l'angle formé par les nouvelles directions OV, OV' de ces plans aura donc aussi tourné de l'angle α ; elle ne sera plus perpendiculaire à la section principale SS' de l'analyseur, les composantes Ov, Ov' seront inégales et les deux moitiés du faisceau transmis par l'analyseur ne posséderont plus la même intensité lumineuse (fig. 355, III'). Il faudra, pour rétablir l'égalité, faire tourner la section principale de l'analyseur d'un angle α , de manière à rendre cette section perpendiculaire à la nouvelle direction OB de la bissectrice. La valeur de cet angle, qu'il est facile de mesurer, fera connaître la déviation imprimée par la substance active au plan de vibration.

On pourra toujours du reste déduire de cet angle la quantité de substance active contenue dans le liquide examiné.

Ajoutons que, pour obtenir une lumière monochromatique, on place dans la flamme d'un bec Bunsen, brûlant à bleu, un petit panier de platine contenant des fragments de chlorure de sodium fondu. La lumière ainsi produite est encore purifiée par une lame de bichromate de potassium qui, placée en avant du système polarisant, ne laisse passer que les rayons jaunes.

602. **Polarimètre de Cornu et J. Duboscq.** — Cet instrument est constitué par une lame de bichromate de potassium, dont nous venons d'indiquer l'utilité, un polariseur, un analyseur et une lunette de Galilée. Le tube à liquide se place entre le polariseur et l'analyseur. Le polariseur est fixe et construit de la manière suivante. On divise un prisme de Nicol en deux parties égales par un trait de scié passant par sa section principale, puis on recolle les deux parties après avoir enlevé, sur la face de section de chacune d'elles, un petit prisme d'un angle de $2^{\circ}30'$. Les sections principales des deux moitiés du Nicol, qui, ainsi modifié, porte le nom de prisme de Jelett et Cornu, font dès lors entre elles un angle de 5° . Les vibrations transmises par chacune des moitiés du polariseur ainsi obtenu seront parallèles à la section principale de cette moitié. Ainsi se trouvera réalisée la disposition que nous avons indiquée ci-dessus.

Il suffira par suite, pour évaluer l'effet rotatoire d'une substance active, de mesurer l'angle α dont il faut faire tourner l'analyseur pour rétablir l'égalité d'éclairement détruite par l'interposition de cette substance. L'analyseur, mobile autour de l'axe de l'instrument, est, à cet effet, muni d'une alidade qui, se déplace sur un cercle gradué en degrés de circonférence, disposition qui permet de mesurer l'angle α . Cet angle connu, on pourra en déduire la proportion de sucre contenue par exemple dans la solution examinée; il suffira pour cela d'examiner toute solution sous une épaisseur constante, 20 centimètres par exemple, et d'avoir déterminé préalablement la valeur en sucre, dans ces conditions, du degré de circonférence. Cette valeur est de $7^{\text{e}}.53$ par litre de solution pour le sucre de canne, de $9^{\text{e}}.92$ pour le sucre de diabète. Du reste, le cercle sur lequel se déplace l'alidade porte généralement une seconde graduation qui permet d'évaluer le déplacement de l'analyseur en centièmes de millimètre de quartz ou en degrés saccharimétriques; nous avons déjà donné la valeur de ces degrés à propos du saccharimètre de Soleil.

603. **Diabétomètre d'Yvon et de J. Duboscq.** — Cet instrument ne diffère du précédent que par la disposition du cercle gradué et par la valeur des degrés. Le cercle est, en effet, placé sur le côté droit de l'instrument, et une disposition spéciale permet de mesurer, à l'aide de ce cercle, les déplacements de l'analyseur. Ces déplacements ne s'évaluent d'ailleurs ni en degrés de circonférence, ni en degrés saccharimétriques. La graduation a été établie empiriquement de telle sorte que chaque degré corresponde à 1 gr. de sucre par litre d'urine, celle-ci étant examinée sous une épaisseur de 20 centimètres; on évite ainsi tout calcul. Cet instrument, exclusivement destiné à la détermination de la quantité de sucre contenue dans les urines diabétiques, est désigné sous le nom de *diabétomètre*.

604. **Polarimètre de Laurent.** — Le polarimètre de Laurent ne diffère de celui de Cornu et de J. Duboscq que par la disposition du système polarisant. Le prisme de Jelett et Cornu est ici remplacé par un prisme de Nicol ordinaire et par une mince lame de gypse, de mica ou de quartz placée au delà du Nicol. Ce Nicol polariseur est mobile autour de l'axe de l'instrument; quant à la lame mince, elle ne recouvre que la moitié d'un diaphragme circulaire, destiné à limiter le faisceau lumineux qui va traverser la substance active, et n'agit donc que sur les vibrations lumineuses

de l'une des moitiés de ce faisceau. Cette lame est taillée parallèlement à l'axe, et son bord diamétral BB' (fig. 353, I) est lui-même parallèle à cet axe; on lui a en outre donné une épaisseur spéciale qui est dite d'une *demi-onde*. L'effet de cette lame, effet que nous bornerons à indiquer ici sans l'expliquer, consiste à donner au plan de vibration de la lumière qui la traverse une direction symétrique, par rapport à l'axe BB' de la lame, de la direction du plan de vibration de la lumière polarisée par le nicol, quelle que soit du reste cette direction. Si donc la section principale du nicol polariseur, ou, ce qui revient au même, le plan de vibration de la lumière incidente, n'est ni parallèle, ni perpendiculaire à l'axe de la lame, les directions des plans de vibration des deux moitiés du faisceau, symétriques par rapport à BB', seront, par exemple, les deux droites OV, OV'. Ainsi se trouvera réalisée la disposition obtenue dans l'appareil précédent avec le prisme de Jelett et Cornu et sur laquelle nous avons déjà insisté.

L'avantage de la disposition imaginée par Laurent consiste en ce qu'il suffit de changer l'angle que fait, avec l'axe de la lame demi-onde, la section principale du polariseur, pour faire varier de la même quantité l'angle que fait, dans chaque moitié du faisceau, le plan de vibration de la lumière avec le plan de symétrie.

La sensibilité de l'instrument est d'autant plus grande que la valeur de cet angle est plus petite, mais l'intensité lumineuse transmise est aussi d'autant plus faible. La sensibilité a par suite une limite qui dépend de la transparence du liquide sur lequel on opère. Il faut, en effet, donner au faisceau lumineux une intensité d'autant plus grande que le liquide soumis à l'examen est moins limpide ou qu'il est observé sous une épaisseur plus grande. L'observateur peut en somme régler à volonté la sensibilité de son instrument en faisant tourner la section principale du polariseur. Cette rotation ne modifie du reste en rien l'égalité d'intensité lumineuse des deux moitiés du faisceau, lorsque celle-ci a été préalablement établie par une orientation convenable de l'analyseur.

Le polarimètre de Laurent est gradué, comme celui de Cornu et J. Duboscq, en degrés de circonférence et en degrés saccharimétriques.

L'instrument que nous venons de décrire exige l'emploi de la lumière monochromatique; grâce à l'addition d'un compensateur de Soleil et J. Duboscq, Laurent a transformé cet instrument de

manière à permettre l'emploi de la lumière blanche. L'instrument anisi modifié constitue un véritable saccharimètre, mais n'est utilisable que pour le dosage des substances qui dispersent le plan de vibration de la lumière blanche de la même manière que le quartz.

LIVRE V

ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME

CHAPITRE PREMIER

PHÉNOMÈNES GÉNÉRAUX DE L'ÉLECTRICITÉ

605. **Phénomènes primitifs. Corps bons et corps mauvais conducteurs.** — Certains corps, tels que le verre, l'ébonite, la résine, le soufre, l'ambre, etc., acquièrent, lorsqu'ils sont tenus à la main et qu'on les frotte avec une étoffe de soie ou de laine, avec une peau de chat ou de lapin, etc., la propriété d'attirer les corps légers; on dit alors que ces corps sont *électrisés* (1) et l'on donne le nom d'*électricité* à la cause qui se manifeste par cet effet d'attraction.

Par contre un grand nombre de corps, au nombre desquels se trouvent les métaux, ne peuvent acquérir, par frottement, les mêmes propriétés, qu'à la condition d'être tenus, non pas directement à la main, mais par l'intermédiaire d'un manche de verre, d'ébonite, etc..., c'est-à-dire par l'intermédiaire de l'un des corps qui appartiennent à la catégorie précédente.

En outre, les corps de la première catégorie ne s'électrisent qu'aux points directement frottés, tandis que ceux de la seconde attirent les corps légers par tous leurs points, même par ceux qui n'ont pas été directement atteints par le frottement.

La propriété d'attirer les corps légers se communique d'un corps A à un autre B par simple contact, et existe alors en tous les points de la surface de B ou seulement aux points de contact de B et de A suivant que B appartient à la seconde ou à la première catégorie de corps.

(1) Du mot grec *ἤλεκτρον*, *ambre*, le phénomène ayant d'abord été observé sur cette substance.

Pour expliquer ces faits, on admet que l'électricité se propage facilement sur les corps de la seconde catégorie, qui sont pour cette raison appelés *bons conducteurs*, tandis que les corps de la première, dits *mauvais conducteurs*, opposeraient à la propagation de l'électricité une résistance que celle-ci ne peut vaincre.

En réalité, il n'y a, dans cette distinction de corps bons et mauvais conducteurs, qu'une question de degré; l'électricité met toujours en effet un certain temps, si minime soit-il, pour se répandre sur les corps les meilleurs conducteurs; par contre elle finit toujours à la longue par vaincre la résistance que lui opposent les corps les plus mauvais conducteurs et par se propager à travers leur masse. Il existe du reste toute une série d'intermédiaires entre les corps très bons conducteurs, comme les métaux, et les corps très mauvais conducteurs, comme le verre, l'ébonite, etc.

L'hypothèse précédente rend compte des manières différentes dont se comportent les substances bonnes ou mauvaises conductrices, lorsqu'on les frotte en les tenant à la main; le corps humain et le sol étant, en effet, relativement bons conducteurs, l'électricité développée par frottement sur une substance bonne conductrice, se propage à travers le corps de l'observateur jusque dans le sol où elle va se perdre; on ne peut donc maintenir l'électricité sur la substance bonne conductrice qu'en interposant entre elle et la main de l'observateur un corps mauvais conducteur; de là le nom d'*isolants* donné aux corps qui conduisent mal l'électricité.

606. Distinction de deux espèces d'électricité. — Si l'on approche un bâton de verre électrisé R d'un *pendule électrique* (fig. 356), constitué par un corps léger B (balle de sureau) suspendu par un fil de soie isolant, le pendule est attiré jusqu'au contact, puis repoussé; un bâton de résine électrisé attire alors le pendule, tandis que le bâton de verre le repousse, et tous les corps électrisés, quels qu'ils soient, se comportent, soit comme le verre (répulsion),

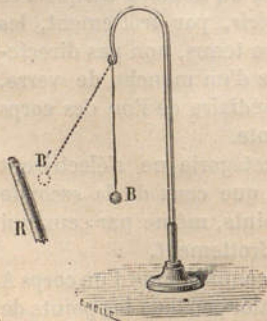


Fig. 356. — Pendule électrique.

soit comme la résine (attraction).

Au point de vue des effets produits sur les corps légers, il y a donc lieu de diviser les corps électrisés en deux catégories, ou,

pour employer une locution consacrée par l'usage, de distinguer deux espèces d'électricité. Mais il ne faut voir dans cette dernière locution que l'expression de deux états électriques différents et non de deux causes distinctes entre elles. On ne connaît pas encore, en effet, la nature intime de l'électricité; mais il est peu probable que les phénomènes électriques soient dus à deux causes distinctes, et tout porte à croire que la cause unique de ces phénomènes est seulement variable de grandeur dans les divers corps électrisés. L'état neutre, c'est-à-dire l'état d'un corps non électrisé, serait ainsi celui qui correspondrait à une *quantité d'électricité dite normale*; les deux états électriques opposés, dont nous avons constaté l'existence, correspondraient, le premier à une quantité d'électricité supérieure, le second à une quantité d'électricité inférieure à la quantité normale. C'est en conformité de cette manière, provisoire et hypothétique, d'envisager la cause des phénomènes électriques, que l'on emploie les termes d'*électricité positive* et d'*électricité négative* pour exprimer l'état des corps qui, dans l'expérience rapportée plus haut, se comportent comme le verre ou comme la résine.

Remarquons en outre que, si l'on touche un corps électrisé A avec un corps B à l'état neutre, chacun des corps A et B se comporte de la même manière, après le contact, envers le pendule électrique; ce contact a donc communiqué à B une partie de l'électricité que A possédait. Il résulte de là que le contact d'un corps électrisé avec un pendule communique à celui-ci une électricité de même nom que celle du corps électrisé. Les phénomènes d'attraction et de répulsion peuvent alors se traduire par cette loi générale :

Deux corps chargés d'électricités de même nom se repoussent et deux corps chargés d'électricités de noms contraires s'attirent.

607. **Lois des attractions et des répulsions électriques.** — On établit ces lois au moyen de la balance de Coulomb (fig. 357). Cet instrument se compose d'une cage cylindrique munie d'une graduation *oc* et dans laquelle on peut introduire, par une ouverture pratiquée en *r*, un tige isolante *i* terminée par une petite sphère *m* en moelle de sureau; la cage est surmontée d'un tube cylindrique *d* terminé par un tambour gradué *e* et un repère fixe *a*. Au centre du tambour est suspendu un fil sans torsion qui soutient une aiguille isolante *p* terminée par une boule *n* également en moelle de sureau.

Pour établir les lois de l'attraction, on tourne le tambour *e* de

manière à amener n en contact avec m sans que le fil de suspension éprouve de torsion; on retire alors m , que l'on électrise par contact avec un corps électrisé, et on l'introduit de nouveau dans la balance. Au moment du contact de m et de n , l'électricité se partage entre ces deux sphères, et n est repoussée à une distance telle que la force t résultant de la torsion du fil fasse équilibre à la force électrique f de répulsion. Or cette force t étant proportionnelle à l'angle de torsion, il en sera de même de la force f ⁽¹⁾.

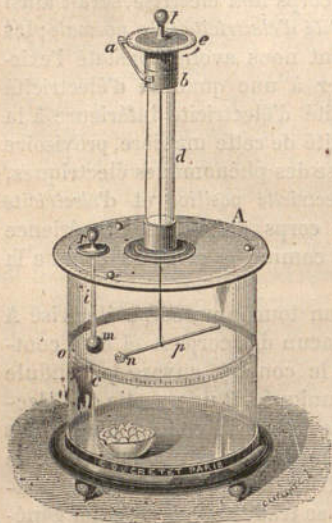


Fig. 337. — Balance de Coulomb.

En faisant tourner le tambour e , dans le sens indiqué par la flèche, d'un angle α par exemple, on rapproche la boule mobile n de la boule fixe m et la force de répulsion f prend une nouvelle valeur, comme on peut s'en assurer en mesurant l'angle de torsion du fil. Le fil étant maintenant tordu par en haut et par en bas, son angle de torsion est égal à l'angle d'écart des deux boules, que l'on peut lire sur la graduation c , augmenté de l'angle α dont on a fait tourner le tambour.

En faisant ainsi plusieurs déterminations et comparant les diverses valeurs des angles de torsion aux distances correspondantes des sphères m et n ⁽²⁾, on trouve que ces angles de torsion, et par suite la force répulsive qui leur est proportionnelle, varient en raison inverse du carré de la distance des centres des sphères; celles-ci sont d'ailleurs assez petites pour que l'on puisse négliger leurs rayons et supposer que les quantités d'électricité qu'elles possèdent sont concentrées à leur centre.

(1) En réalité la proportionnalité de la force f à l'angle de torsion n'est pas rigoureuse; mais elle est suffisamment exacte tant que l'angle de torsion n'est pas trop grand.

(2) Ces distances peuvent se déduire de la valeur de l'angle d'écart lu sur la graduation c . Lorsque cet angle est assez petit on peut admettre que la distance des deux sphères est précisément donnée par le numéro de la division en face de laquelle se trouve la sphère n .

On peut charger les sphères m et n d'électricités contraires, disposer l'expérience de manière que la force de torsion du fil de suspension fasse équilibre à la force électrique d'attraction et s'assurer que cette force attractive varie, avec la distance des sphères, suivant la même loi que la force répulsive.

On conclut de là que *les forces électriques qui s'exercent entre deux quantités d'électricité existant en deux points sont en raison inverse du carré de la distance de ces points.*

Les quantités d'électricité qui existent sur l'une ou l'autre des sphères m et n peuvent d'ailleurs être variables, et l'expérience montre que, toutes choses égales d'ailleurs, la force attractive ou répulsive f varie avec ces quantités. La charge de l'une des sphères restant constante, nous dirons que la quantité d'électricité que possède l'autre sphère, c'est-à-dire sa *charge électrique*, est double, triple... lorsque, pour la même distance, la force attractive ou répulsive est devenue double, triple... Il résulte de cette définition même que *les forces électriques sont proportionnelles aux quantités d'électricité ou aux masses d'électricité entre lesquelles elles s'exercent.*

608. Unités de quantité d'électricité. — L'unité électrostatique de quantité d'électricité, dans le système C. G. S., est la quantité qui, agissant sur une quantité égale située à 1 centim., produit une force attractive ou répulsive égale à une dyne (§ 39, page 43).

D'après les lois du paragraphe précédent, le nombre de dynes qui s'exerce entre deux masses électriques égales à q et à q' unités électrostatiques C.G.S., situées en des points distants de d centimètres, sera donné par la formule :

$$f = \frac{qq'}{d^2}.$$

Cette force sera répulsive ou attractive suivant que les masses q et q' seront de même signe ou de signes contraires.

L'unité électrostatique C.G.S. de quantité étant trop petite pour les besoins courants, on emploie une unité, dite pratique, le *coulomb* qui vaut 3×10^9 unités électrostatiques C.G.S.

609. Distribution de l'électricité dans les corps bons et mauvais conducteurs. — La distribution de l'électricité dans un corps électrisé diffère essentiellement suivant que le corps est bon ou mauvais conducteur.

a. — Dans les corps bons conducteurs, l'électricité réside à la sur-

face des corps. On peut le vérifier facilement à l'aide d'une sphère conductrice A (fig. 358) montée sur un pied isolant P et de deux hémisphères métalliques B, B', de rayon plus grand que celui de la sphère et munis chacun d'un manche isolant V, V'. On électrise la sphère, puis on l'enveloppe avec les deux hémisphères et l'on

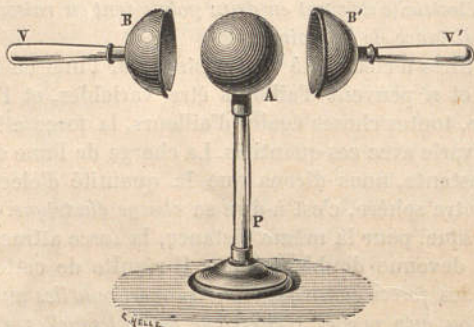


Fig. 358. — Distribution de l'électricité sur les corps bons conducteurs.

amène la surface interne de ces hémisphères en contact avec la surface externe de la sphère. Si l'on rompt ensuite le contact et que l'on sépare les deux hémisphères, on constate que ceux-ci sont électrisés et que la sphère est au contraire à l'état neutre.

On peut encore vérifier que l'électricité est tout entière à la surface des corps conducteurs à l'aide de la balance de Coulomb et du *plan d'épreuve*, ou disque de clinquant supporté par une tige isolante, avec lequel on recouvre un point de la surface du conducteur et qui se charge de la quantité d'électricité qui existait sur l'élément de surface recouvert. Lorsque le plan est introduit au lieu et place de la sphère *m* dans la balance de Coulomb, on constate qu'il est ou n'est pas électrisé, suivant qu'il a été mis en contact avec un point de la surface extérieure ou un point de la surface intérieure du conducteur.

Il en est encore ainsi lorsque le conducteur est discontinu, comme c'est le cas, par exemple, pour une cage métallique.

L'angle de torsion du fil, lorsque la sphère *n* (fig. 357), préalablement chargée d'une quantité fixe d'électricité, est en équilibre, permet, en outre, de calculer la charge du plan d'épreuve ou, ce qui revient au même, celle de l'élément de surface du conducteur

que le plan d'épreuve a recouvert (1). En touchant successivement divers points du corps électrisé, on peut donc déterminer, par ce procédé, la répartition de l'électricité à la surface extérieure du conducteur.

On trouve ainsi que l'électricité est uniformément répartie sur une sphère conductrice isolée et éloignée de tout corps conducteur. Si le corps électrisé a une forme différente de celle de la sphère, la répartition de l'électricité n'est plus uniforme; d'une manière générale, l'électricité s'accumule en quantité d'autant plus grande en une région que la courbure y est plus accusée.

Ces résultats d'expérience sont conformes à ceux auxquels on arrive par le calcul, en regardant l'électricité comme constituée par un fluide dont les molécules s'attirent ou se repoussent suivant les lois établies plus haut.

b. — Dans les corps mauvais conducteurs, l'électricité ne réside pas seulement à la surface, mais pénètre à l'intérieur. Si, en effet, on électrise un mauvais conducteur A par un contact prolongé avec un conducteur électrisé B, puis que l'on supprime le contact et que l'on décharge le corps A en faisant communiquer les divers points de sa surface avec le sol, l'électricité reparait après un certain temps à la surface de ce corps.

Les corps mauvais conducteurs, ou *diélectriques*, se distinguent donc des bons conducteurs ou *anélectriques*, non seulement par la résistance qu'ils opposent au déplacement de l'électricité, mais encore par la distribution de cette électricité, qui pénètre dans l'intérieur des diélectriques, tandis qu'elle n'existe qu'à la surface des conducteurs. Ce dernier fait apparait dès lors comme une conséquence de la facilité de déplacement de l'électricité sur un corps conducteur et de la répulsion des particules du fluide électrique, répulsion qui amène ces particules à se distribuer de telle sorte que leur distance réciproque soit la plus grande possible.

610. **Densité électrique. Force électrique. Pression électrostatique.** — On appelle *densité électrique* en un point d'un conducteur la charge électrique de l'unité de surface considérée autour de ce point. Il résulte de ce que nous venons de dire relativement à la distribution de l'électricité sur les corps conducteurs que la densité est la même en tous les points d'une sphère conductrice,

(1) Lorsque le plan d'épreuve est enlevé normalement à la surface qu'il recouvre, il emporte toute la charge de cette surface.

isolée, en équilibre et éloignée de tout corps conducteur ou de tout corps électrisé. Sur un ellipsoïde de révolution placé dans les mêmes conditions, la densité croît de l'extrémité du petit axe à celle du grand, et l'on démontre que le rapport des densités au niveau de ces deux extrémités est égal au rapport des axes. A l'extrémité d'une pointe, qui peut être assimilée à un ellipsoïde dont l'un des axes est infiniment grand par rapport à l'autre, la densité doit être infiniment grande.

La *force électrique* en un point d'un conducteur est la résultante des actions qu'exerceraient, sur l'unité de quantité d'électricité positive située en ce point, toutes les masses électriques comprises dans tous les éléments de surface des corps électrisés existant autour de ce point. On démontre, par des considérations dans lesquelles nous ne pouvons entrer ici, que si d est la densité électrique en un point quelconque d'un conducteur en équilibre, la force électrique, définie comme nous venons de le faire, est, dans le voisinage immédiat de ce point, égale à $4\pi d$.

La force électrique est nulle à l'intérieur de tout conducteur en équilibre; elle ne commence à se faire sentir que dans le voisinage immédiat de la surface du conducteur où elle est du reste normale en chaque point à cette surface et dirigée vers l'extérieur. Si en effet cette double condition n'était pas remplie, l'électricité, qui se propage librement dans toute la masse des conducteurs, devrait pénétrer dans leur intérieur, ce qui n'arrive jamais, ou se déplacer à leur surface, ce qui est contraire à l'état d'équilibre que nous avons supposé exister.

L'existence de la force électrique et la direction de cette force, en chaque point de la surface d'un conducteur électrisé en équilibre conduisent à admettre que l'électricité tend à quitter le conducteur. On appelle *pression électrostatique* sur un élément de surface d'un conducteur électrisé la résultante des actions qu'exercent toutes les masses agissantes sur la charge qui existe dans l'unité de surface de cet élément. On démontre que, si d est la densité sur cet élément de surface, la pression électrostatique y a pour valeur $2\pi d^2$ et est toujours dirigée vers l'extérieur.

Si un corps conducteur conserve son électricité malgré l'existence de la pression électrostatique qui existe en chacun de ses points, cela tient à ce que l'air s'oppose, par suite de sa mauvaise conductibilité électrique, au départ de l'électricité. Toutefois si la densité électrique et par suite la pression électrostatique devien-

nent suffisantes, la résistance de l'air peut être vaincue et le conducteur se décharge alors partiellement dans l'air. C'est ce qui arrive, en particulier, sur tous les conducteurs qui présentent des pointes ou des arêtes vives, puisque la densité doit être infinie au niveau de ces pointes ou de ces arêtes ; l'air environnant se charge alors de la même électricité que le corps conducteur et est repoussé, si bien qu'il se produit au niveau de la pointe un *vent électrique*, que l'on peut mettre en évidence en approchant la flamme d'une bougie d'une pointe conductrice électrisée. Si la pointe est suffisamment mobile, elle est elle-même repoussée par les molécules d'air auxquelles elle a transmis son électricité, ainsi qu'on peut s'en assurer au moyen de la disposition qui constitue le *tourniquet électrique* (fig. 359).

La propriété que possèdent ainsi les pointes de décharger les corps conducteurs auxquels elles sont reliées, propriété qui peut encore se manifester dans d'autres conditions indiquées plus

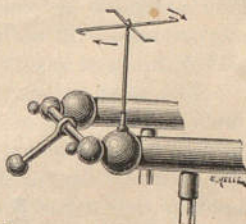


Fig. 359. — Tourniquet électrique.

loin, est généralement désignée sous le nom de *pouvoir des pointes*.

611. **Électrification par contact et par frottement.** — Il suffit, pour électriser un corps A à l'état neutre, de le mettre en contact avec un corps électrisé : l'électricité se répand sur toute la surface du corps A, s'il est bon conducteur ; elle ne se distribue qu'au point de contact, s'il est mauvais conducteur. Les phénomènes qui précèdent permettent de se rendre facilement compte de ce mode d'électrification, dont nous avons du reste déjà fait usage pour étudier, avec le plan d'épreuve, la distribution de l'électricité à la surface d'un conducteur.

Lorsqu'on frotte deux corps l'un contre l'autre, l'électricité se développe aussi bien sur le corps frottant que sur le corps frotté ; mais le pendule électrique permet de constater que les deux corps ainsi électrisés sont toujours chargés d'électricités de signes contraires. Pour un même corps frottant, le signe de l'électricité développée sur ce corps, et par suite sur le corps frotté, dépend de la nature et de l'état de la surface de celui-ci. C'est ainsi que le verre poli s'électrise positivement quand on le frotte avec une étoffe de laine, tandis que la gomme laque et le verre dépoli s'électrisent négativement dans les mêmes conditions.

612. **Électrisation par influence.** — L'expérience montre que tout corps à l'état neutre s'électrise lorsqu'on le place dans le voisinage d'un corps déjà électrisé. On donne à ce phénomène le nom d'*électrisation par influence*; le corps qui a été soumis à ce mode d'électrisation est dit *influencé*, celui qui a produit ce phénomène est dit *influencant*.

Le cas général de l'influence électrique est réalisé par un corps électrisé placé à l'intérieur d'un conducteur entièrement fermé; comme il est impossible de réaliser rigoureusement ces conditions dans la pratique, on a généralement recours, pour démontrer les

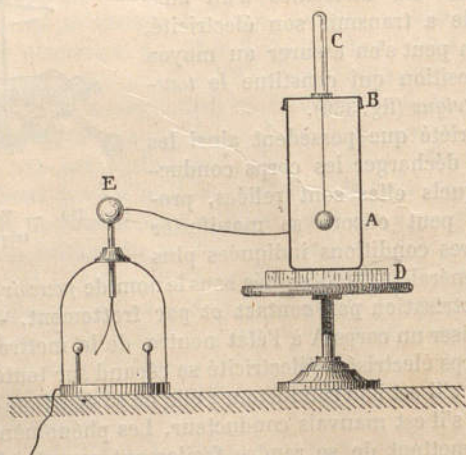


Fig. 360. — Cylindre de Faraday.

lois générales de l'influence, à la disposition, imaginée par Faraday, qui consiste à introduire dans un vase cylindrique profond A (fig. 360), dont la partie supérieure présente une ouverture assez petite, un corps électrisé porté par un manche isolant C.

L'état électrique du cylindre peut être déterminé au moyen d'un *électroscope*; on appelle ainsi un vase en verre dont le goulot donne passage à une tige métallique terminée, à l'extérieur par une sphère E, à l'intérieur par deux lames d'or très minces et très légères, et dont la base inférieure métallique porte deux colonnes conductrices situées à une certaine distance des lames d'or et communiquant avec le sol. Les deux lames d'or restent accolées

l'une à l'autre tant qu'elles sont à l'état neutre; elles divergent au contraire dès qu'elles sont chargées de la même électricité, et leur divergence est d'autant plus grande que cette charge est plus forte. L'électroscope doit être mis en communication avec le cylindre au moyen d'un fil conducteur assez long pour que le cylindre n'exerce aucune action d'influence sur l'instrument.

Les choses ainsi disposées, si l'on introduit dans le cylindre une sphère chargée, par exemple, d'électricité positive, on constate les divers faits suivants.

1^o Les feuilles de l'électroscope divergent lorsque la sphère est introduite dans le cylindre, et la divergence est constante, quelle que soit la position de la sphère à l'intérieur du conducteur; ceci prouve : *a*), que le cylindre est électrisé; *b*), que la quantité d'électricité développée est indépendante de la position de la sphère.

2^o Au moyen du plan d'épreuve et de la balance de Coulomb, on constate que la surface intérieure du conducteur est électrisée négativement et la surface extérieure positivement. Les deux quantités d'électricités positive et négative du cylindre sont d'ailleurs égales entre elles, car, si l'on retire la sphère, les feuilles d'or de l'électroscope retombent et tous les points du cylindre reviennent à l'état neutre.

3^o Les quantités d'électricités positive et négative du cylindre sont chacune égales à celle qui existe sur la sphère électrisée, car si l'on amène cette sphère au contact de la surface intérieure du cylindre, l'électricité négative disparaît entièrement; la divergence des feuilles d'or reste d'ailleurs invariable, ce qui montre que la distribution de l'électricité positive à l'extérieur n'éprouve aucune modification.

4^o Par l'emploi du plan d'épreuve et de la balance de Coulomb, on constate encore que la distribution de l'électricité $+$ à l'extérieur du cylindre est indépendante de la position de la sphère intérieure; la distribution de l'électricité $-$ sur la surface intérieure du cylindre et celle de l'électricité $+$ sur la sphère elle-même dépendent au contraire de la position de cette sphère.

5^o Si l'on met un point quelconque de la surface extérieure ou intérieure du cylindre en communication avec le sol, l'électricité positive disparaît entièrement et les feuilles d'or retombent, mais rien n'est changé quant à la distribution de l'électricité intérieure du cylindre, et de celle de la sphère.

6^o Si l'on supprime la communication avec le sol après l'avoir

établie, puis que l'on sorte la sphère, l'électricité négative se répand sur la surface extérieure du cylindre et s'y répartit comme l'était l'électricité positive.

7° Si l'on fait communiquer le cylindre avec le sol, et que l'on réunisse l'électroscope à un corps conducteur à l'état neutre que l'on approche ensuite du cylindre, on n'observe aucune divergence des feuilles d'or. Par suite, un conducteur fermé et en communication avec le sol protège complètement les corps extérieurs contre l'influence des corps électrisés situés à l'intérieur.

8° Réciproquement, si la sphère intérieure, supposée à l'état neutre, est mise en communication avec l'électroscope, les feuilles d'or restent immobiles lorsqu'on approche du cylindre un corps extérieur électrisé. En conséquence, un conducteur fermé soustrait entièrement les corps intérieurs à l'influence des corps extérieurs électrisés.

La surface du conducteur fermé peut d'ailleurs être discontinue, comme celle d'une cage métallique, sans que la protection de la cage sur les corps intérieurs cesse d'exister. La même protection est encore réalisée par un conducteur plan, de dimensions suffisantes et en communication avec le sol, interposé entre un corps électrisé et un autre corps.

Ces conducteurs, qui protègent contre l'influence, portent le nom d'*écrans électriques*.

9° Les faits précédents, constatés par l'expérience, rendent compte des phénomènes que l'on observe lorsqu'on fait agir par influence une sphère électrisée et isolée B (fig. 361) sur un conducteur CD. Si la sphère est chargée positivement, le conducteur CD est chargé négativement sur les régions les plus voisines de B et positivement sur les régions les plus éloignées; entre ces deux régions existe une *ligne neutre*, de part et d'autre de laquelle la densité électrique est d'autant plus grande qu'on la considère en un point plus éloigné. La ligne neutre se rapproche ou s'éloigne de l'extrémité D du conducteur suivant qu'on rapproche ou qu'on éloigne davantage celui-ci de la sphère influençante. Pour une même distance du conducteur à la sphère influençante, la ligne neutre est d'autant plus éloignée de cette sphère que le conducteur est plus long.

Quel que soit le point de CD que l'on met en communication avec le sol, c'est toujours l'électricité positive qui disparaît, sans que d'ailleurs il en résulte aucune modification quant à la quantité

ou à la distribution de l'électricité négative sur le corps influencé; mais cette électricité négative prend une autre distribution si l'on éloigne CD de manière à annuler l'influence de B.

Ajoutons que les quantités d'électricités positive et négative développées sur CD sont chacune plus petites, dans l'expérience de la figure 361, que la quantité d'électricité positive qui existe sur B. Il n'y a égalité, en effet, que quant à la charge de B d'une part et à la somme des charges, soit positives, soit négatives développées sur l'ensemble des corps environnants et en particulier sur les murs de la pièce dans laquelle l'expérience est réalisée. Il faut remarquer d'ailleurs que ces murs qui sont en communication avec le sol, jouent le rôle d'écran pour tous les corps extérieurs.

Si le conducteur CD se termine par une pointe du côté de la sphère influençante,

l'électricité développée sur l'extrémité D s'écoule en partie par la pointe et vient neutraliser partiellement l'électricité de la sphère; la neutralisation peut être même sensiblement complète si le conducteur CD est en communication avec le sol.

Ajoutons que le corps influencé réagit sur le corps influençant. Dans le cas, par exemple, où ce dernier est constitué par une sphère, la densité électrique ne reste pas constante en tous les points de sa surface, et présente une valeur maxima dans la région la plus voisine du corps influencé, une valeur minima dans la région la plus éloignée.

De semblables phénomènes d'influence se produisent lorsqu'on approche un corps électrisé d'un pendule électrique; ils expliquent les attractions et les répulsions que l'on constate dans les divers cas dont il a été question plus haut.

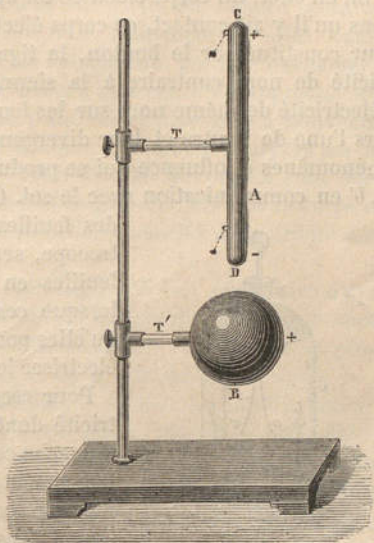


Fig. 361. — Électrisation par influence.

613. **Électroscope à feuilles d'or.** — Les phénomènes d'influence montrent comment on peut, avec un électroscope, reconnaître si un corps est électrisé et déterminer la nature de l'électricité dont ce corps est chargé.

Si, en effet, un corps électrisé est approché du bouton B (fig. 362) sans qu'il y ait contact, ce corps électrise par influence le conducteur constitué par le bouton, la tige et les feuilles, attire l'électricité de nom contraire à la sienne sur le bouton et repousse l'électricité de même nom sur les feuilles; celles-ci s'écartent dès lors l'une de l'autre et leur divergence est encore accrue par les phénomènes d'influence qui se produisent sur les deux colonnes *b* et *b'* en communication avec le sol. Ces colonnes, situées en face

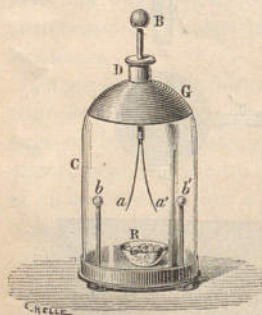


Fig. 362. — Électroscope à feuilles d'or.

des feuilles d'or à l'intérieur de l'électroscope, servent en outre à mettre les feuilles en communication avec le sol lorsque ces feuilles divergent trop et qu'elles pourraient ainsi venir toucher et électriser les parois en verre de la cloche.

Pour reconnaître la nature de l'électricité dont un corps X est chargé, on approche ce corps du bouton B de l'électroscope et l'on met celui-ci en communication avec le sol, en le touchant avec le doigt par exemple; les feuilles d'or, qui divergeaient d'abord, retombent, l'électricité de même nom que celle du

corps X ayant ainsi disparu, et l'électroscope reste chargé d'électricité de nom contraire à celle du corps X. Cette électricité se distribue librement dans le conducteur constitué par le bouton, la tige et les feuilles, lorsque, après avoir retiré le doigt, on éloigne le corps X. On approche alors lentement et progressivement de l'électroscope un corps A chargé d'électricité connue, positive par exemple, et l'on observe attentivement les feuilles. Si celles-ci commencent par se rapprocher pour diverger ensuite, c'est que le corps X était chargé d'électricité positive; si la divergence des feuilles augmente dès qu'on approche le corps A de l'électroscope, le corps X était au contraire chargé d'électricité négative. Le corps A agit en effet par influence sur l'électroscope chargé d'électricité de nom contraire à celle de X, comme si cet électroscope était à l'état neutre, et l'électricité ainsi développée s'a-

joute à celle que possède déjà l'électroscope. Le corps A développe donc dans les feuilles, lorsqu'on l'approche du bouton, des quantités d'électricité positive d'autant plus grandes que sa distance au bouton est moindre. Si les feuilles sont déjà négatives (c'est-à-dire si le corps X était positif), leur électricité est d'abord neutralisée par suite de cette nouvelle influence et elles commencent par se rapprocher; mais l'électricité positive développée par le corps A augmentant à mesure que celui-ci s'approche du bouton, les feuilles deviennent positives et divergent à nouveau. Si au contraire les feuilles de l'électroscope ont été chargées par le corps X d'électricité positive, c'est-à-dire si le corps X était négatif, la divergence des feuilles doit augmenter dès que le corps A y développe par influence une nouvelle quantité d'électricité positive.

On conçoit, d'après ce qui précède, qu'il soit nécessaire d'approcher le corps A d'assez loin et très lentement, si l'on ne veut laisser passer inaperçu le rapprochement des feuilles qui se produit lorsque les électricités de X et de A sont de même signe.

614. **Conservation de l'électricité.** — Si l'on introduit, dans le cylindre de Faraday réuni à l'électroscope, plusieurs corps électrisés d'une façon quelconque, on observe, dans les lames de l'électroscope, une divergence qui reste constante lorsque l'on met en contact un nombre quelconque de ces corps; il résulte de là que *la charge totale d'un ensemble de corps n'est nullement modifiée par le contact des uns avec les autres.*

De même, lorsqu'on frotte l'un contre l'autre, à l'intérieur du cylindre de Faraday, deux corps non électrisés, les feuilles de l'électroscope restent accolées, mais divergent si l'on retire l'un ou l'autre des deux corps; ces corps se sont donc électrisés par le frottement, et les charges de signes contraires développées sur eux sont égales: ce qui revient à dire que *la somme algébrique des quantités d'électricité développées par le frottement est nulle.*

Nous avons déjà vu d'autre part (§ 612, 2^o) que les quantités d'électricités positive et négative développées par influence sur un corps à l'état neutre sont égales entre elles; il en est de même pour un corps déjà électrisé. *L'influence ne modifie donc pas la charge totale d'un corps.*

Ce sont là autant de cas particuliers du principe général de la *conservation de l'électricité*, principe dont Lippmann a le premier indiqué les belles conséquences et qui peut s'énoncer comme suit :

La quantité totale d'électricité répartie sur un système de corps déterminé reste constante tant que les corps du système n'empruntent ni ne cèdent d'électricité à d'autres corps non compris dans le système. On ne peut produire ou détruire une quantité quelconque d'électricité sans produire ou détruire une quantité égale d'électricité contraire.

CHAPITRE II

DU POTENTIEL ÉLECTRIQUE

615. **Champ électrique. Lignes de force.** — Les phénomènes d'influence que nous venons d'étudier montrent que tout corps ou tout système de corps électrisés exerce une action sur les corps environnants. L'ensemble des points de l'espace où cette action se fait sentir porte le nom de *champ électrique*.

D'après cette définition même, il existe, en chaque point du champ, une *force électrique*, dont la grandeur et la direction dépendent d'ailleurs de la position du point considéré, de la grandeur et de la distribution des masses électriques auxquelles le champ est dû. C'est cette force qui rend compte, en particulier, des divers phénomènes étudiés dans le Chapitre précédent.

La valeur de la force électrique en chaque point du champ est l'*intensité du champ* en ce point. Dans le cas le plus simple, lorsque la force électrique est due à un seul corps conducteur électrisé, la force électrique ou l'intensité du champ en chaque point est d'autant plus grande que le point considéré est plus voisin de la surface du conducteur.

On appelle *ligne de force* d'un champ électrique toute ligne qui, en chacun de ses points, est tangente à la direction de la force électrique en ce point. Il est évident que par tout point du champ passe une ligne de force et une seule, puisqu'en chacun de ces points existe une force électrique dont la direction est déterminée.

Nous avons vu que la direction de la force électrique était, en chacun des points de la surface d'un conducteur en équilibre, normale à cette surface; toutes les lignes de force doivent donc aboutir normalement à la surface des conducteurs. Il n'y a pas lieu d'ailleurs de considérer ces lignes à l'intérieur des conducteurs, puisque la force électrique y est nulle.

Un champ est dit *uniforme* lorsque la force électrique a, en

tous ses points, la même valeur et la même direction; les lignes de force sont alors des droites parallèles. Réciproquement si les lignes de force d'un champ sont des droites parallèles, le champ est uniforme.

616. **Travail électrique.** — Considérons un champ électrique et supposons que l'unité d'électricité positive soit placée en un point de ce champ sans qu'il en résulte aucune modification en ce qui concerne la distribution de l'électricité sur les masses auxquelles le champ est dû. L'unité d'électricité considérée sera soumise à l'action de la force qui s'exerce au point du champ où elle est placée et se déplacera, si elle est absolument libre, suivant la direction de cette force, c'est-à-dire suivant la ligne de force sur laquelle elle est située. Ce déplacement nécessite un travail égal au travail qu'il faudrait développer pour s'opposer à ce même déplacement, et il a pour mesure le produit de la force par le chemin parcouru (§ 40). Si la force électrique n'est pas la seule force qui agisse sur l'unité d'électricité considérée, le déplacement pourra ne plus avoir lieu dans la direction de la force électrique; mais cette force exécutera pourtant encore un travail qui sera, à chaque instant, égal au produit du déplacement par la projection de la force sur la direction de ce déplacement.

Si, au lieu de considérer l'unité d'électricité positive placée dans le champ, nous lui substituons une masse électrique quelconque q , l'action sur la masse q de chacune des masses qui donnent naissance au champ est proportionnelle à q , et la résultante de ces actions est donc à chaque instant q fois plus grande que la force qui agirait dans les mêmes conditions sur l'unité d'électricité; quant à la direction de la résultante des forces qui agissent sur la masse q considérée, elle sera la même que dans le cas où l'on n'a affaire qu'à l'unité d'électricité. Le travail électrique s'évalue d'ailleurs dans ce cas comme nous l'avons dit plus haut, mais en tenant compte de la nouvelle valeur de la force électrique.

Le travail électrique est regardé comme positif lorsque le déplacement de l'électricité positive a lieu suivant la direction de la projection de la force électrique sur la direction du déplacement; il est dit négatif dans le cas contraire; ce travail est d'ailleurs nul chaque fois que l'un des facteurs par lesquels on le mesure est lui-même nul. De là résultent diverses conséquences.

a. — Le travail électrique est nul pour tout déplacement qui se

produit, soit à la surface d'un conducteur en équilibre, car la force électrique résultante est alors normale à la direction du déplacement (§ 610), soit à l'intérieur d'un conducteur, car la force électrique agissante est alors constamment nulle.

b. — En particulier, le déplacement d'une masse d'électricité à la surface du sol ne correspond à aucun travail, puisque le sol est bon conducteur; il en est de même, mais en vertu d'une autre raison, pour tout déplacement dont les divers points sont situés à l'infini par rapport aux masses agissantes, car, les actions de ces masses étant chacune en raison inverse du carré de la distance à laquelle elle s'exerce, la force électrique est nulle dans ces conditions.

c. — On démontre d'ailleurs que le travail nécessaire pour amener une masse électrique quelconque d'un point A d'un champ électrique en un autre point B du même champ est constant pour un champ donné et indépendant du chemin suivi pour aller du point A au point B.

Il résulte de là qu'il faut toujours le même travail pour amener une masse donnée q d'électricité d'un point déterminé A du champ en un point quelconque d'un conducteur. Soient, en effet, T et T' les deux valeurs du travail électrique correspondant au déplacement de q depuis A jusqu'aux deux points C et C' du même conducteur. On peut aller de A en C, soit directement, soit en suivant le chemin AC'C; or le travail étant nul de C' en C sur le conducteur et le travail total étant indépendant du chemin parcouru, on doit avoir $T = T'$.

De ce qui précède on conclut encore que le travail correspondant au déplacement d'une masse électrique depuis un point quelconque A situé sur le sol jusqu'à un point quelconque C situé à l'infini est toujours nul. En effet, transportons la masse considérée, à la surface de la terre, du point A en un point B suffisamment éloigné des masses agissantes pour que les actions de ces masses puissent être regardées comme nulles et transportons ensuite la même masse de B en C. Le travail correspondant au transport de la masse électrique de A jusqu'en B est nul puisqu'il s'effectue à la surface du sol et le travail correspondant au transport de B en C est également nul puisque B et C sont tous deux à l'infini. Le travail électrique qui correspond au déplacement considéré est donc nul quand on suit le chemin que nous venons d'indiquer et doit par suite être nul dans tous les cas.

d. — Si l'on rapproche ces résultats de ce qui précède, on voit immédiatement que :

1° Le travail électrique correspondant au déplacement d'une masse q depuis un point A du champ jusqu'à un point B du sol est indépendant de la position du point B sur le sol ;

2° Le travail électrique correspondant au déplacement d'une masse q depuis le point A du champ jusqu'au sol est égal à celui qui correspond au déplacement de la même masse depuis le point A jusqu'à l'infini, le transport de q depuis le sol jusqu'à l'infini n'entraînant aucun travail.

617. **Potentiel.** — On appelle *potentiel* d'un point A d'un conducteur ou d'un champ électrique le travail qui correspondrait au déplacement de l'unité d'électricité positive depuis le point considéré A jusqu'en un point quelconque du sol ou en un point quelconque situé à l'infini.

On donne au potentiel le signe du travail effectué par les forces électriques pendant ce déplacement.

Par suite de la définition même que nous venons de donner, le potentiel de tout point du sol et celui de tout point situé à l'infini sont égaux à 0.

Il résulte en outre de ce qui a été dit dans le paragraphe précédent que :

1° Le potentiel est le même en tous les points de l'intérieur ou de la surface d'un même conducteur ;

2° Le potentiel est, en général, différent aux divers points d'un même champ, car la force électrique, qui est l'un des facteurs du travail auquel on donne le nom de potentiel, varie avec la position du point considéré dans le champ ;

3° Si l'on double, triple... toutes les masses électriques agissantes, la force électrique devient double, triple... en chaque point du champ, et le potentiel de chacun de ces points devient lui-même double, triple... ;

4° Si l'on appelle V_1 et V_2 les potentiels de deux points A et B du champ électrique, la différence $V_1 - V_2$ représente le travail correspondant au déplacement de l'unité d'électricité positive depuis A jusqu'en B, et ce travail est indépendant du chemin parcouru ; si c'est une masse q d'électricité qui se déplace de A en B, le travail correspondant est $q(V_1 - V_2)$ en valeur absolue.

On démontre d'ailleurs qu'en appelant q, q', q'', \dots , les masses électriques auxquelles est dû le champ et r, r', r'', \dots , les distances

respectives de ces masses à un point A de ce champ, le potentiel V du point A est donné par l'expression :

$$V = \frac{q}{r} + \frac{q'}{r'} + \frac{q''}{r''} + \dots$$

618. **Unités C. G. S. de potentiel.** — Le potentiel étant un travail et l'unité C. G. S. de travail étant l'erg, l'erg est aussi l'unité C. G. S. de potentiel.

On définit généralement l'unité C. G. S. de potentiel par le potentiel d'une sphère isolée dont nous allons indiquer le rayon et la charge.

Soit pour cela à calculer le potentiel V d'une sphère isolée chargée d'une masse Q d'électricité en équilibre.

Toute l'électricité étant située à la surface, les diverses masses élémentaires q , en lesquelles on peut décomposer la charge Q sont à la même distance R du centre ; donc, le potentiel du centre de la sphère, et par suite celui d'un point quelconque de la sphère (§ 617, 1°), seront, d'après la formule précédente :

$$V = \frac{q}{R} + \frac{q}{R} + \frac{q}{R} + \dots = \frac{Q}{R}.$$

Or, si le rayon R est égal à 1 centimètre et si Q est égal à l'unité électrostatique C.G.S d'électricité, la valeur correspondante $\frac{1}{1} = 1$ du potentiel sera l'unité électrostatique C.G.S. de potentiel. Cette unité est donc le potentiel d'une sphère isolée dont le rayon est égal à 1 centimètre et dont la charge est égale à l'unité électrostatique C.G.S. d'électricité.

Cette unité étant trop grande pour les besoins courants, on fait usage d'une unité pratique, appelée *volt*, qui vaut $\frac{1}{3 \times 10^9}$ unité électrostatique C.G.S.

619. **Surfaces de niveau.** — On appelle *surface de niveau* ou *surface équipotentielle* l'ensemble des points d'un champ électrique qui ont même potentiel. Les surfaces de niveau sont, comme nous allons le démontrer, normales aux lignes de force qu'elles rencontrent.

Soient, en effet, A et B deux points pris sur une même surface de niveau, de potentiel V. Le transport de l'unité de masse électrique depuis A jusqu'au sol est égal à V, quel que soit le chemin

parcouru. Or soit T le travail correspondant au déplacement de A en B ; V étant le travail correspondant au transport depuis B jusqu'au sol, on aura :

$$T + V = V, \quad \text{d'où :} \quad T = 0.$$

Mais ce même travail T est égal au produit de l'unité de masse électrique par le déplacement et par la projection de la force suivant la direction de ce déplacement. La masse et le déplacement n'étant pas nuls, pour que ce travail T soit égal à 0, il est nécessaire que le déplacement, c'est-à-dire la surface de niveau sur laquelle chemine l'unité de masse électrique, soit normale en tous ses points à la direction de la force. En d'autres termes, toute surface de niveau coupe normalement toutes les lignes de force qu'elle rencontre.

Le potentiel étant constant en tous les points de la surface d'un conducteur, comme en tous les points du sol, la surface du sol, ainsi que celle de tout conducteur en équilibre, sont des surfaces de niveau.

Il est facile, d'après ce que nous venons de dire, de prévoir ce qui doit se passer lorsque deux conducteurs électriques, éloignés l'un de l'autre, sont mis en communication.

Soient d'abord deux conducteurs A et B au même potentiel, mis en communication par un fil conducteur assez fin pour qu'il ne résulte, du fait du fil, aucune modification dans la charge de chacun des conducteurs A et B ; d'après ce qui précède, aucun échange d'électricité ne se produira entre ces deux conducteurs.

En effet, tout échange d'électricité entre deux conducteurs peut toujours être regardé comme résultant du transport d'une certaine quantité d'électricité positive de l'un des conducteurs sur l'autre. Or si un tel transport s'effectue à travers le fil par le seul fait de l'existence de ce fil, c'est-à-dire par la seule action des masses du champ, c'est qu'un certain travail électrique a été effectué pour transporter la masse qui s'est déplacée depuis le conducteur A jusqu'au conducteur B . Mais ceci n'est pas possible si A et B sont au même potentiel, c'est-à-dire si les surfaces des deux conducteurs font partie d'une même surface de niveau, puisque, d'après ce qui a été dit plus haut, le transport d'une masse électrique entre deux points pris sur une telle surface n'entraîne aucun travail.

Donc aucun échange d'électricité ne se produit entre deux con-

ducteurs en communication, si leurs potentiels sont égaux. Il n'en est plus de même entre deux conducteurs dont les potentiels sont différents; il y a alors échange d'électricité et l'échange cesse dès que l'égalité des potentiels s'est établie. Le transport de l'électricité positive se fait du conducteur qui est au potentiel le plus élevé sur celui dont le potentiel est le plus faible. De même, s'il existe dans un champ électrique une masse d'électricité positive absolument libre, cette masse se déplacera toujours de façon que le travail des forces électriques soit positif, c'est-à-dire vers les régions où le potentiel est moins élevé qu'au point où elle se trouve.

620. Les phénomènes électriques ne dépendent que des différences de potentiel. — Pour démontrer cette proposition, il est nécessaire d'exprimer d'abord en fonction du potentiel la force électrique qui existe en un point quelconque du champ.

Soient pour cela deux surfaces de niveau S_1 et S_2 très voisines, dont les potentiels sont respectivement V_1 et V_2 , et F la force électrique en un point A de la première. Si l'unité d'électricité positive se déplace depuis A sur S_1 jusqu'en B sur S_2 en suivant la ligne de force qui passe par A , le travail correspondant sera $F \times e$, e représentant la longueur de la portion de ligne de force comprise entre S_1 et S_2 (1). Mais ce même travail est encore égal à $V_1 - V_2$; on aura donc :

$$F \times e = V_1 - V_2, \quad \text{d'où :} \quad F = \frac{V_1 - V_2}{e}.$$

Supposons maintenant que l'on augmente d'une même quantité v le potentiel de tous les points d'un champ électrique, de telle sorte que la différence des potentiels de deux points quelconques soit la même qu'avant. Il est évident tout d'abord que les surfaces primitives de niveau seront encore des surfaces équipotentielles; par suite, les lignes de force, qui leur sont normales, n'auront subi aucune modification de forme et la force électrique conservera donc, en chaque point du champ, sa direction première.

En outre, cette force électrique F' , au point A par exemple, aura pour valeur :

$$F' = \frac{V_1 + v - (V_2 + v)}{e} = \frac{V_1 - V_2}{e} = F.$$

(1) Nous supposons que les deux surfaces S_1 et S_2 sont assez voisines pour qu'on puisse négliger les variations que peut présenter F dans les divers points de la portion e de la ligne de force.

En conséquence, la force électrique conservant, en tous les points du champ, sa direction et son intensité primitives, il ne peut y avoir rien de changé; l'état électrique initial ne subit aucune modification, et aucun phénomène électrique ne peut prendre naissance.

Les phénomènes électriques ne dépendent donc pas de la valeur absolue du potentiel aux divers points du champ, mais seulement de la différence des potentiels en ces points.

621. **Comparaison du potentiel avec les indications de l'électromètre.** — Nous avons vu, dans les paragraphes précédents, que :

1° Le potentiel est constant en tous les points d'un même conducteur en équilibre;

2° Si l'on double, triple,... chacune des charges agissantes, le potentiel de chaque point devient double, triple...;

3° Si deux conducteurs sont au même potentiel et qu'on les mette en communication par un fil assez fin pour qu'il ne résulte de ce fait aucune modification appréciable dans la distribution des charges électriques, aucun transport d'électricité ne se produit d'un conducteur à l'autre, aucune modification ne survient dans l'état électrique de ces conducteurs;

4° Si l'on met en communication par un fil fin deux conducteurs qui ne sont pas au même potentiel, un transport d'électricité se fait du conducteur dont le potentiel est le plus élevé sur l'autre, jusqu'à ce que les deux conducteurs soient au même potentiel.

Or, si nous mettons un conducteur en équilibre en communication avec un électromètre, c'est-à-dire avec un électroscope muni d'une graduation permettant de mesurer l'angle de divergence des feuilles, l'expérience montre que :

1° La divergence des feuilles est constante quel que soit le point de l'intérieur ou de la surface extérieure du conducteur qui est directement mis en contact avec l'électromètre;

2° Si l'on augmente ou si l'on diminue les charges agissantes, la divergence des feuilles augmente ou diminue;

3° Quand la divergence des feuilles est la même pour deux conducteurs isolés en équilibre, cette divergence n'éprouve aucun changement lorsque les deux conducteurs sont mis en communication par un fil fin;

4° Si, au contraire, la divergence n'est pas la même pour deux conducteurs en équilibre et qu'on mette ceux-ci en communication

par un fil fin, un transport d'électricité se fait du conducteur pour lequel la divergence est la plus grande sur l'autre, jusqu'à ce que la divergence soit la même pour les deux conducteurs.

En comparant ces résultats d'expérience aux résultats théoriques rappelés au commencement de ce paragraphe, on voit que les indications de l'électromètre varient en même temps et dans le même sens que la grandeur abstraite à laquelle on donne le nom de potentiel.

On peut alors définir le potentiel d'une façon élémentaire par les indications d'un électromètre et dire que :

Le potentiel d'un conducteur est un nombre, fourni par l'électromètre, constant pour tous les points d'un même conducteur en équilibre, nombre qui caractérise l'état électrique d'un corps, comme la température caractérise l'état calorifique. On a pris pour 0 de l'échelle des potentiels, le potentiel du sol qui, mis en communication avec l'électromètre, n'imprime aucune déviation aux feuilles d'or.

L'unité électrostatique de potentiel est définie alors par la divergence que l'on observe lorsque l'électromètre est réuni, par un fil long et mince, à une sphère isolée, en équilibre, de rayon égal à 1 centimètre et chargée d'une quantité d'électricité égale à l'unité électrostatique C.G.S. de quantité. Les potentiels 2, 3..., sont de même caractérisés par les divergences observées lorsque la sphère précédente, placée dans les conditions indiquées, a une charge égale à 2, 3... unités électrostatiques C.G.S. de quantité.

Remarquons que l'analogie, signalée ci-dessus, entre le potentiel et la température n'existe qu'en ce qui concerne les nombres qui caractérisent le potentiel d'une part, la température de l'autre. Tandis, en effet, que l'égalité de température de tous les points d'un corps homogène indique que la chaleur est uniformément répartie dans ce corps, l'égalité de potentiel de tous les points d'un conducteur homogène n'entraîne pas une égale répartition de l'électricité dans toute la masse de ce corps. De même, lorsqu'un corps s'est mis en équilibre de température avec les autres corps situés dans la même enceinte que lui, la température du premier ne dépend pas de la situation que les seconds occupent dans l'enceinte; au contraire, le potentiel d'un corps dépend de la position des corps qui l'environnent.

Si l'on a plus particulièrement en vue le transport ou l'écoulement d'électricité qui se produisent entre deux conducteurs com-

muniqunt entre eux et dont les potentiels sont différents, on peut comparer le potentiel électrique au niveau hydrostatique d'un liquide dans un vase. Lorsqu'on met, en effet, en communication deux vases contenant chacun une certaine quantité de liquide, un écoulement se produit dans le tube de communication, si les niveaux liquides ne sont pas à la même hauteur au-dessus du sol, et cesse dès que l'égalité de niveau est réalisée. De même, un écoulement d'électricité se produit entre deux conducteurs dont les potentiels ou niveaux électriques sont différents et cesse lorsque ces potentiels sont devenus égaux.

On peut encore comparer le potentiel à l'énergie potentielle que possède un corps placé à une certaine altitude au-dessus du niveau du sol; le travail électrique qui correspond au déplacement d'une masse électrique, située en un point A d'un champ électrique, depuis ce point A jusqu'au sol, a alors pour analogue le travail de la pesanteur qui correspond à la chute d'un corps depuis un point A de l'espace jusqu'au niveau du sol. Les surfaces de niveau d'un champ électrique ont par suite pour analogues les surfaces d'égale altitude que l'on appelle aussi surfaces de niveau. Cette analogie est complétée par ce fait que l'on a pris comme surface de niveau électrique 0 le sol, de même que l'on a pris pour altitude 0 l'altitude de la surface de la mer.

622. **Mesure des potentiels.** — On peut employer, pour mesurer ou comparer des potentiels, des instruments fondés sur des principes très différents et dont nous ne pouvons donner ici la théorie complète.

Nous avons déjà décrit l'un des plus simples parmi ces instruments, l'électromètre à feuilles d'or; nous nous bornerons à donner encore quelques détails sur un instrument plus précis, l'électromètre à quadrans de Thomson modifié par Mascart.

L'instrument se compose d'une aiguille très légère, en aluminium, ayant la forme représentée en A (fig. 363, I et II) et d'une boîte métallique constituée par quatre secteurs ou quadrans distincts 1, 2, 3, 4 (fig. 363, I et III); l'aiguille est suspendue par deux fils de cocon (*suspension bifilaire*) à l'intérieur de ces quadrans, et le tout est enfermé dans une cage métallique C (fig. 364) formant écran; cette cage est munie, dans la partie qui a été enlevée sur la figure, d'une glace à faces parallèles à travers laquelle on peut observer un petit miroir; celui-ci est porté par une tige verticale en platine qui est réunie à l'aiguille et dont l'extrémité inférieure

plonge dans de l'acide sulfurique contenu dans un vase en verre.

Les quadrans opposés par le sommet, 1 et 3, 2 et 4 (fig. 363, I), sont réunis entre eux par un fil conducteur, mais chaque couple est isolé de l'autre et est réuni à une borne métallique t, t' (fig. 364) isolée de la cage; à une troisième borne b aboutit de même un fil de platine dont l'extrémité inférieure plonge dans l'acide sulfurique contenu dans le vase en verre, de telle sorte que l'aiguille d'aluminium communie en somme, par une suite ininterrompue de corps conducteurs solides et liquides, avec cette troisième borne b .

Il est dès lors possible de mettre chaque paire de quadrans et l'aiguille en communication avec trois conducteurs différents.

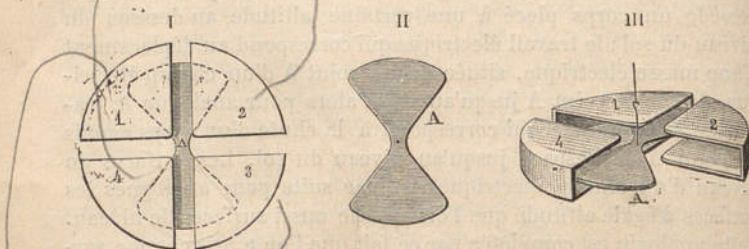


Fig. 363. — Aiguille et quadrans de l'électromètre Thomson modifié par Mascart. (Chappuis et Berget, *Physique générale*.)

La position d'équilibre de l'aiguille étant celle qu'indique la figure 363, I, il est évident que l'aiguille restera dans cette position, qu'elle soit ou non électrisée, si les deux paires de quadrans sont en même temps au même potentiel. L'aiguille sera au contraire attirée par les deux quadrans dont le potentiel est le plus élevé, si les potentiels sont inégaux en 1 et 3 d'une part, en 2 et 4 de l'autre. La déviation de l'aiguille entraînant d'ailleurs une torsion des fils de suspension, il y aura une nouvelle position d'équilibre qui dépendra de la différence des potentiels existant sur les deux couples de quadrans 1 et 3, 2 et 4.

Si, comme on le fait généralement, les deux paires de quadrans communiquent avec les deux pôles d'une pile dont le milieu est au sol, les potentiels en 1 et 3, 2 et 4 sont, comme nous le verrons plus loin, égaux et de signes contraires. On démontre que, si l'on représente alors par V la valeur absolue de ces potentiels et par V_1 le potentiel de l'aiguille, la déviation α de celle-ci est donnée par la formule :

$$\alpha = 2KV V_1$$

dans laquelle K est une constante qui dépend de l'instrument.

La déviation de l'aiguille est donc alors proportionnelle à son potentiel, c'est-à-dire au potentiel du corps avec lequel elle communique; cette relation permet de comparer les potentiels des corps que l'on mettra successivement en communication avec l'aiguille de l'électromètre.

Ajoutons que l'on peut mesurer très exactement la déviation de l'aiguille, ou du miroir qui tourne avec elle, par la méthode de Poggendorff dont nous avons déjà donné le principe (§ 391).

Nous décrirons plus loin un autre électromètre, l'électromètre de Lippmann, qui permet de mesurer des différences très faibles de potentiel et qui, pour cette raison, est employé en Physiologie.

Des méthodes spéciales ont en outre été imaginées pour la mesure de très grandes différences de potentiel; nous ne les exposerons pas, mais nous indiquerons prochainement les résultats auxquels elles ont conduit pour les différences de potentiel qui correspondent à des étincelles de diverses longueurs.

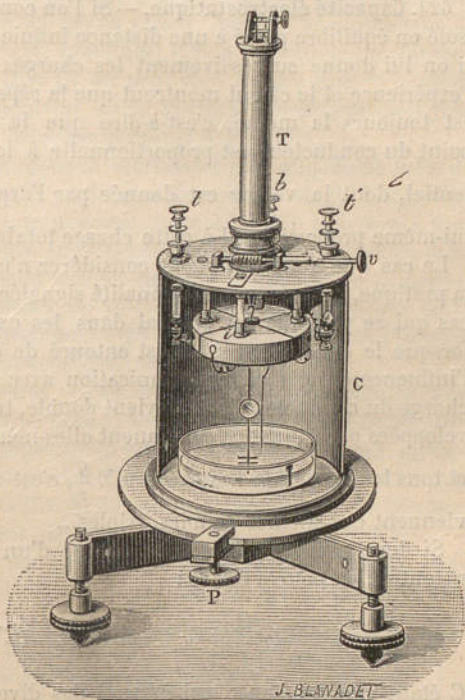


Fig. 364. — Électromètre Thomson modifié par Mascart (La partie antérieure de la cage métallique a été enlevée). (Chappuis et Berget, *Physique générale*.)

CHAPITRE III

CONDENSATEURS ÉLECTRIQUES

623. **Capacité électrostatique.** — Si l'on considère un conducteur isolé en équilibre placé à une distance infinie de tout autre corps et si on lui donne successivement les charges totales Q , $2Q$, $3Q$..., l'expérience et le calcul montrent que la répartition de l'électricité est toujours la même, c'est-à-dire que la charge q de chaque point du conducteur est proportionnelle à la charge totale; le potentiel, dont la valeur est donnée par l'expression $\Sigma \frac{q}{r}$, est donc lui-même proportionnel à cette charge totale.

Le cas que nous venons de considérer n'est pas réalisable dans la pratique, mais la proportionnalité signalée existe encore dans le cas qui se présente en général dans les expériences, c'est-à-dire lorsque le conducteur isolé est entouré de conducteurs soumis à l'influence et mis en communication avec le sol. En effet, si la charge du conducteur isolé devient double, triple..., les charges développées par influence deviennent elles-mêmes doubles, triples..., et tous les termes de l'expression $\Sigma \frac{q}{r}$, c'est-à-dire du potentiel, deviennent eux-mêmes doubles, triples...

Si donc nous appelons Q la charge d'un conducteur et V son potentiel, on pourra écrire :

$$\frac{Q}{V} = C. \quad \text{ou} \quad Q = CV, \quad (1)$$

C étant une constante qui dépend des diverses circonstances qui influent sur Q ou sur V , c'est-à-dire de la forme du conducteur, de ses dimensions, de la position des conducteurs voisins.

Cette constante C est appelée *capacité électrostatique* du conducteur considéré.

Si nous considérons un conducteur isolé placé dans les conditions que nous avons spécifiées et si nous lui communiquons successivement des charges Q, Q', Q'' ... son potentiel deviendra V, V', V'' ... et, d'après ce que nous venons de dire, on aura :

$$\frac{Q}{V} = \frac{Q'}{V'} = \frac{Q''}{V''} = \dots = C, \quad (2)$$

d'où l'on tire :

$$C = \frac{Q' - Q}{V' - V} \quad (3)$$

On peut donc dire que la *capacité électrostatique d'un conducteur est le quotient de l'accroissement de charge qu'on lui communique par l'accroissement de potentiel qui en résulte*, lorsque le conducteur se trouve dans les conditions précitées; si l'on remarque que lorsque $V' - V = 1$ on a $C = Q' - Q$, on peut dire encore que la *capacité électrostatique d'un conducteur est la quantité d'électricité qu'il faut lui communiquer pour élever son potentiel d'une unité*.

Ces définitions de la capacité électrostatique rappellent celle de la *capacité calorifique* et il y a là une nouvelle analogie à signaler, mais cette analogie ne se poursuit point dans les causes qui font varier ces deux capacités. On sait par exemple que la capacité calorifique d'un corps dépend seulement de sa nature et de sa masse, et qu'elle est indépendante de la forme du corps ainsi que de la disposition et de la forme des corps qui l'entourent; c'est l'inverse au contraire pour la capacité électrostatique.

624. **Unités de capacité.** — La relation (1) montre que, si l'on fait $Q = 1$ et $V = 1$, on a $C = 1$; en d'autres termes, l'unité électrostatique C.G.S. de capacité est celle d'un conducteur qui, chargé avec l'unité électrostatique C.G.S. d'électricité, a un potentiel égal à l'unité électrostatique C.G.S. de potentiel quand tous les conducteurs environnants sont reliés au sol.

Considérons en particulier une sphère de rayon R , isolée, éloignée de tout conducteur et possédant une charge Q ; on sait (§ 618) que son potentiel est $\frac{Q}{R}$; par suite, en tenant compte de la relation (1) du paragraphe précédent, on aura :

$$V = \frac{Q}{R} = \frac{Q}{C}; \quad \text{d'où :} \quad C = R.$$

La capacité d'une sphère éloignée de tout conducteur est donc exprimée par le même nombre que son rayon.

En outre, si l'on fait $Q = 1$ et $R = 1$, on a $V = 1$ et $C = 1$; par suite, l'unité électrostatique C.G.S. de capacité peut être définie la capacité d'une sphère de rayon égal à 1 centim., puisque si l'on charge cette sphère avec l'unité électrostatique C.G.S. d'électricité, son potentiel est égal à 1.

Cette unité de capacité étant trop petite, on lui substitue une

unité plus grande, que l'on déduit des unités pratiques de quantité et de potentiel. L'unité pratique de capacité, appelée *farad*, est celle d'un conducteur qui, avec une charge de 1 coulomb, acquiert un potentiel de 1 volt. Si nous considérons encore un conducteur sphérique dont la charge soit de 1 coulomb, ou de 3×10^9 unités électrostatiques C.G.S. (§ 608), le rayon R que doit avoir cette sphère pour qu'une telle charge lui donne un potentiel égal à 1 volt, ou à $\frac{1}{3 \times 10^2}$ unité électrostatique C.G.S. de potentiel (§ 618), sera donné par la formule :

$$V = \frac{Q}{R}, \quad \text{ou} \quad \frac{1}{3 \times 10^2} = \frac{3 \times 10^9}{R};$$

d'où :

$$R = 3^2 \times 10^{11} \text{ centim.}$$

Le farad est donc la capacité d'une sphère éloignée de tout conducteur dont le rayon est de $3^2 \times 10^{11}$ centim. ; il vaut par suite $3^2 \times 10^{11}$ unités électrostatiques C.G.S. de capacité.

Cette unité est trop grande, et l'on emploie dans la pratique le *microfarad*, ou millionième de farad, qui est donc la capacité d'une sphère dont le rayon est $\frac{3^2 \times 10^{11}}{1000000} = \frac{3^2 \times 10^{11}}{10^6} = 3^2 \times 10^5$ centim. = 9 kilom. Le microfarad vaut par suite $3^2 \times 10^5$ unités électrostatiques C.G.S. de capacité.

La terre, dont le rayon est de $\frac{40000}{2\pi}$ kilom., aura en conséquence une capacité égale à :

$$\frac{40000}{2\pi \times 9} = 708 \text{ microfarads.}$$

625. Condensation électrique. — On appelle *condensateurs* des instruments qui permettent de réaliser de grandes capacités sous un petit volume.

Nous considérerons d'abord un condensateur sphérique.

Soit une sphère A (fig. 365), de rayon R, en communication avec une source d'électricité dont le potentiel est constant et égal à V. Si cette sphère est seule, elle prendra, pour se mettre au potentiel V, une charge Q telle que :

$$V = \frac{Q}{R}.$$

Supposons que l'on supprime alors la communication de la sphère A avec la source et que l'on entoure cette sphère d'un conducteur sphérique B concentrique à A et à peu près fermé. Si la charge Q de A est positive, il se développera sur la face interne de B une charge $-Q$ et sur la face externe une charge $+Q$ (§ 612). Dès lors, le potentiel d'un point quelconque de la sphère A sera dû aux trois charges $+Q$ de A, $-Q$ et $+Q$ de B; ces charges sont d'ailleurs réparties uniformément sur A et sur B, et le potentiel en un point quelconque de A, et en particulier au centre, sera :

$$V' = \frac{Q}{R} - \frac{Q}{R'} + \frac{Q}{R''}, \quad (1)$$

R' et R'' étant les rayons intérieur et extérieur du conducteur B. Mais R'' est plus grand que R'; par suite $\frac{Q}{R''}$ est plus petit que $\frac{Q}{R'}$, si bien que V' est plus petit que $\frac{Q}{R}$, c'est-à-dire plus petit que V.

La présence de B a par conséquent produit une diminution du potentiel de A, sans que d'ailleurs la charge de A ait été modifiée. Si donc A est mis de nouveau en communication avec la source dont le potentiel est toujours égal à V, l'égalité de potentiel s'établira par le passage d'une certaine quantité d'électricité de la source sur la sphère A. Celle-ci pourra par suite, grâce à la présence du conducteur B, recevoir une charge plus grande qu'elle n'aurait reçue sans cela.

Il en sera à plus forte raison de même si le conducteur B communique avec le sol, car la charge $+Q$ de la face externe de B s'écoule alors et le potentiel V'' de A est donné par l'expression :

$$V'' = \frac{Q}{R} - \frac{Q}{R'}. \quad (2)$$

En comparant les égalités (1) et (2), on voit que V'' est plus petit

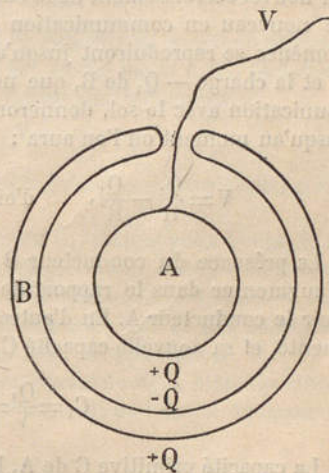


Fig. 365. — Condensateur sphérique.

que V' ; par suite, lorsque A sera mis en communication avec la source, l'augmentation de charge nécessaire pour que le potentiel soit de nouveau égal à V , sera plus considérable que dans le cas précédent.

Chaque accroissement de charge de la sphère A développera d'ailleurs par influence une augmentation de la charge — de B ; de là, résultera une nouvelle diminution du potentiel actuel de A et un nouvel accroissement de la charge de ce conducteur, s'il est mis de nouveau en communication avec la source. Les mêmes phénomènes se reproduiront jusqu'au moment où la charge $+Q_1$ de A et la charge $-Q_1$ de B, que nous supposons toujours en communication avec le sol, donneront à A un potentiel V , c'est-à-dire jusqu'au moment où l'on aura :

$$V = \frac{Q_1}{R} - \frac{Q_1}{R'}, \quad \text{d'où :} \quad Q_1 = V \frac{RR'}{R' - R}. \quad (3)$$

La présence du conducteur B relié au sol a donc eu pour effet d'augmenter dans le rapport de Q_1 à Q la charge que peut recevoir le conducteur A. En d'autres termes, la capacité de A a augmenté, et sa nouvelle capacité C_1 est donnée par la relation :

$$C_1 = \frac{Q_1}{V} = \frac{R'R}{R' - R}. \quad (4)$$

La capacité primitive C de A, lorsque B n'existe pas, est au contraire :

$$C = \frac{Q}{V} = R.$$

On appelle *force condensante* le rapport $\frac{C_1}{C}$ des capacités après et avant l'adjonction du conducteur B relié au sol ; cette force est égale à

$$\frac{C_1}{C} = \frac{R'}{R' - R}.$$

Si l'on représente par e la différence $R' - R$, et si e est assez petit pour que l'on puisse remplacer R' par R dans le numérateur, on a :

$$\frac{C_1}{C} = \frac{R}{e}.$$

En substituant à C sa valeur R, on obtient :

$$C_1 = \frac{R^2}{e} = \frac{4\pi R^2}{4\pi e} = \frac{S}{4\pi e}, \quad (5)$$

S étant la surface du conducteur sphérique A.

Quant à la nouvelle charge Q_1 , elle sera, d'après la relation (4) :

$$Q_1 = C_1 V = V \frac{S}{4\pi e}. \quad (6)$$

Si l'on éloigne le conducteur B, la capacité de A redevient égale à C ; comme d'ailleurs la charge est restée égale à Q_1 , la sphère A prend un nouveau potentiel V_1 donné par la formule :

$$Q_1 = CV_1.$$

L'ensemble des conducteurs A et B forme un *condensateur* ; A est appelé *collecteur* et B *condenseur*.

La formule qui donne la valeur de C_1 , établie pour le cas de la sphère, est vraie encore pour tout condensateur dont les deux conducteurs, ou les deux *armatures*, sont des surfaces parallèles très voisines ; tel est le cas des condensateurs plans et des bouteilles de Leyde dont nous donnons plus loin la description.

Soit par exemple un condensateur formé de deux plateaux circulaires de 30^{cm} de rayon, placés à 0^{cm}.25 l'un de l'autre ; la capacité sera, d'après la formule (5) :

$$C_1 = \frac{\pi \times 30^2}{4\pi \times 0.25} = 900 \text{ unités électrostatiques C.G.S de capacité,}$$

$$\text{ou : } C_1 = \frac{900}{3^2 \times 10^5} = \frac{900}{900000} = \frac{1}{1000} \text{ de microfarad.}$$

D'après la relation $Q_1 = C_1 V$, la charge du plateau collecteur sera donc de $\frac{1}{1000}$ de microcoulomb par volt contenu dans le potentiel V. En d'autres termes, quand V est exprimé en volts et C_1 en microfarads ou en farads, la formule $Q_1 = C_1 V$ fait connaître la charge en microcoulombs ou en coulombs.

626. **Pouvoir inducteur spécifique. Charge résiduelle.** — Les expériences de Cavendish et de Faraday ont montré que, toutes choses égales d'ailleurs, la capacité d'un condensateur dépend de la nature du corps isolant interposé entre les deux armatures.

On appelle *pouvoir inducteur spécifique* ou *constante diélectrique*

d'une substance, le rapport de la capacité d'un condensateur dont le corps isolant est constitué par cette substance à la capacité d'un condensateur identique dans lequel la lame isolante serait l'air.

Mais la capacité d'un condensateur ne dépend pas seulement de la nature du diélectrique : elle varie encore, lorsque ce diélectrique n'est pas un gaz, avec la durée de la charge. L'électricité développée sur les deux armatures se porte en effet sur les deux faces de la lame isolante et semble pénétrer peu à peu dans cette lame; si bien que, si l'on vient à mettre les deux armatures en communication avec le sol, la lame diélectrique conserve encore pendant un certain temps une charge à laquelle on a donné le nom de *charge résiduelle*.

La variation de la capacité électrique d'un condensateur avec la durée de la charge rend très difficile la détermination du pouvoir inducteur spécifique du diélectrique; on mesure généralement la valeur de ce pouvoir dans le cas où la durée de charge est extrêmement faible. Les nombres du tableau suivant sont dus à Maxwell :

Air	1,00	Ebonite.....	de 2,21 à 2,76
Essence de térébenthine.	2,21	Soufre.....	3,84
Paraffine.....	2,32	Verre.....	de 5,83 à 6,34

627. Formes usuelles des condensateurs. — Application à l'électroscope. — *a.* — Le condensateur d'Épinus est formé de deux

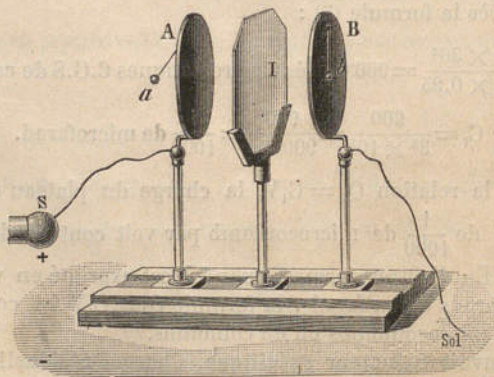


Fig. 366. — Condensateur d'Épinus.

plateaux métalliques A et B (fig. 366) séparés par une lame de verre I; les plateaux et la lame sont portés par des pieds isolants, mobiles le

long d'une planchette, de telle sorte que l'on peut faire varier à volonté la distance des armatures au diélectrique. Pour charger ce condensateur, on relie l'un des plateaux au sol et l'on met l'autre en communication avec une source à potentiel constant S.

b. — La bouteille de Leyde (fig. 367) est un condensateur de forme à peu près cylindrique. La lame isolante est une bouteille en verre mince dont le goulot G est fermé par un bouchon ; l'armature extérieure ou condensateur est constituée par une lame d'étain E collée extérieurement sur le fond et sur les parois de la bouteille jusqu'à une certaine distance du goulot ; l'armature intérieure est formée par une seconde lame d'étain collée à l'intérieur de la bouteille en face de la précédente, ou par des feuilles de clinquant enfermées dans la bouteille, et par une tige métallique T qui, traversant le bouchon du goulot, se termine extérieurement par un bouton B



Fig. 367. — Bouteille de Leyde.

et intérieurement par une ou plusieurs pointes en contact avec la feuille d'étain ou avec les feuilles de clinquant. Le bouchon et la partie de la bouteille qui n'est pas recouverte d'étain sont enduits extérieurement d'un vernis à la gomme laque.

Pour charger ce condensateur il suffit de mettre l'armature extérieure en communication avec le sol, en la tenant à la main par exemple, et de relier le bouton de l'armature intérieure à une source dont le potentiel est constant.

c. — On emploie fréquemment des condensateurs à grande surface constitués par des feuilles d'étain séparées au moyen de lames de mica ou de papier imprégné de paraffine. Les feuilles d'étain de rang impair communiquent entre elles et constituent l'une des armatures ; l'autre armature est de même constituée par les feuilles d'étain de rang pair également réunies. C'est cette forme que l'on donne aux condensateurs-étalons de capacité.

d. — Volta a transformé l'électroscope en électroscope condensateur en remplaçant le bouton extérieur par un plateau recouvert de vernis sur lequel on place le plateau condenseur verni également et muni d'un manche isolant ; les deux couches de vernis constituent la lame isolante. Cet instrument (fig. 368) permet de

révéler la présence d'électricité sur des sources trop faibles pour agir directement sur l'électroscope simple.

A cet effet, on met l'un des plateaux, le plateau supérieur par

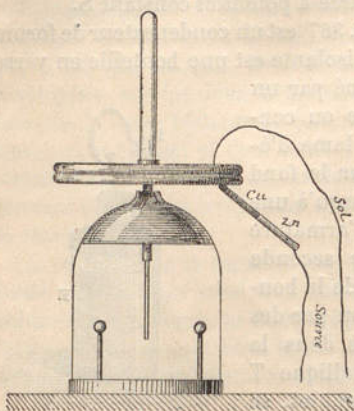


Fig. 368. — Électroscope condensateur.

exemple, en communication avec le sol, tandis que l'autre est relié à la source. Grâce aux phénomènes de condensation, la charge empruntée à la source par ce plateau est ainsi supérieure à celle qu'il prendrait, si le plateau supérieur n'existait pas. Si l'on enlève alors le plateau supérieur après avoir supprimé la communication de ce plateau avec le sol, ainsi que celle du plateau inférieur avec la source, la charge de ce plateau inférieur se répand dans les feuilles d'or qu'elle fait diverger. L'électricité des feuilles

est du reste de même signe que celle de la source, si l'on opère comme nous venons de l'indiquer.

628. Énergie électrique. — L'électricité n'est qu'une forme particulière de l'énergie et le principe général de la conservation de l'énergie lui est applicable. Un corps électrisé est capable de produire un travail ; ce corps possède donc une énergie potentielle au même titre qu'un corps pesant maintenu à une certaine hauteur au-dessus du niveau du sol.

En vertu du principe que nous venons de rappeler, l'énergie d'un corps électrisé est égale au travail qu'il faudrait dépenser contre les forces électriques pour amener ce corps à l'état d'électrisation qu'il possède, de même que l'énergie d'un corps maintenu à une certaine hauteur est égale au travail qu'il faudrait dépenser contre les forces de la pesanteur pour élever ce corps à cette hauteur. Si donc nous considérons un corps chargé d'une masse Q et à un potentiel V , son énergie est égale au travail qu'il a fallu dépenser pour amener la charge Q du potentiel zéro au potentiel V . Il faut remarquer toutefois que le transport de cette charge Q s'est fait peu à peu et que le potentiel du corps, qui était d'abord zéro, a augmenté

progressivement avec la charge, si bien que le travail effectué est moindre que le travail VQ qui, comme nous l'avons vu (§ 617, 4^o), correspondrait au déplacement en bloc de la charge Q du potentiel zéro au potentiel V . On démontre d'ailleurs que ce travail et par suite l'énergie électrique W qu'il représente, sont donnés par la formule :

$$W = \frac{1}{2} VQ. \quad (1)$$

ou en d'autres termes que l'énergie électrique W d'un conducteur est égale au demi produit de sa charge par son potentiel :

L'énergie d'un conducteur en communication avec le sol est donc nulle puisque le potentiel du conducteur est alors zéro.

Les charges développées par influence sur un conducteur isolé ne modifient point son énergie puisque la somme algébrique de ces charges est toujours nulle.

Si V et Q sont exprimés en unités électrostatiques C.G.S. de potentiel et de masse, l'énergie W est exprimée en ergs. Lorsque, au contraire, V est exprimé en volts et Q en coulombs, W est exprimé en une nouvelle unité à laquelle on a donné le nom de *joule*, et qui est dès lors l'unité pratique de travail en Électricité. Par suite, si dans la formule

$$W = \frac{1}{2} VQ,$$

on fait $V = 1$ volt $= \frac{1}{3 \times 10^9}$ unité électrostatique C.G.S. de potentiel et $Q = 1$ coulomb $= 3 \times 10^9$ unités électrostatiques C.G.S. de quantité, on aura :

$$W = \frac{1}{2} 1 \times 1 \text{ joule} = \frac{1}{2} \frac{1}{3 \times 10^9} 3 \times 10^9 \text{ ergs} = \frac{1}{2} 10^7 \text{ ergs.}$$

Le joule est donc un travail de 10^7 ergs. Comme d'ailleurs l'erg (§ 41, pag. 44) vaut $\frac{1}{98.1 \times 10^6}$ kilogrammètres, on a :

$$1 \text{ joule} = \frac{10^7}{98.1 \times 10^6} = \frac{10}{98.1} = \frac{1}{9.81} \text{ kgmètre.}$$

L'unité pratique de travail électrique ou *joule* vaut donc sensiblement un dixième de kilogrammètre.

629. **Groupelement des condensateurs.** — L'énergie accumulée dans un condensateur n'est due qu'à la charge du collecteur, le conden-

seur étant relié au sol; cette énergie W sera donc égale à $\frac{1}{2}VQ$ en désignant par Q la charge du collecteur. Si, dans la formule

$$W = \frac{1}{2}VQ, \quad (1)$$

on remplace V ou Q par leurs valeurs tirées de l'équation (4), page 858, il vient :

$$W = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} CV^2, \quad (2)$$

expression qui fournit la valeur de l'énergie en fonction de la capacité et du potentiel.

En remplaçant, dans la même formule (1), Q par sa valeur donnée par l'expression (6) de la page 859, on aura :

$$W = \frac{1}{2} \frac{S}{4\pi e} V^2. \quad (3)$$

Donc, lorsqu'on charge un condensateur avec une source électrique qui fournit un potentiel déterminé V , pour disposer d'une plus grande énergie, il faut diminuer l'épaisseur e de la lame isolante ou augmenter la surface S du condensateur.

La formule (3) montre en outre que l'énergie d'un même condensateur est proportionnelle au carré du potentiel auquel on le porte; il y a donc encore avantage à augmenter ce potentiel pour disposer d'une plus grande énergie.

Toutefois on ne peut augmenter indéfiniment le potentiel, ni diminuer au delà d'une certaine limite l'épaisseur de la lame isolante; en effet, la pression électrostatique exercée sur chaque face de cette lame par l'électricité accumulée sur les deux armatures acquerrait, dans l'un et l'autre cas, une intensité suffisante pour briser la lame isolante. On peut au contraire augmenter sans inconvénients la surface des condensateurs. Mais, comme des condensateurs à grande surface seraient peu maniables, on préfère employer plusieurs condensateurs de surface plus petite que l'on associe les uns aux autres. Ces condensateurs ont la forme de grandes bouteilles ou de *jarres* (fig. 369 J) et l'on peut les assimiler à des condensateurs fermés; leur ensemble constitue une batterie.

Batterie en surface. — On démontre que si l'on réunit, d'une part les armatures intérieures de toutes les bouteilles d'une même bat-

terie, d'autre part les armatures extérieures de ces bouteilles et que l'on mette les premières en communication avec la source au potentiel V , les secondes en communication avec le sol, on réalise un nouveau condensateur dont la capacité est égale à la somme des capacités des bouteilles employées. Ce mode de groupement,

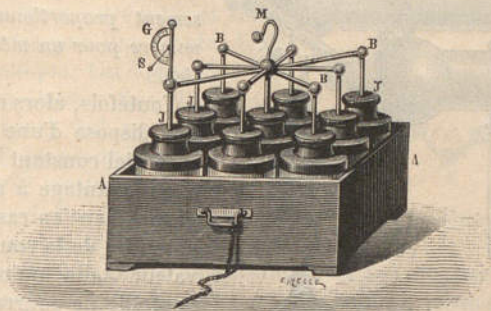


Fig. 369. — Batterie en surface.

représenté sur la fig. 369, porte le nom de groupement en *surface* ou en *quantité*. Si toutes les bouteilles ont même capacité et si leur nombre est n , la capacité de la batterie sera nC et son énergie,

$$W = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{nC} = \frac{1}{2} nCV^2,$$

sera, pour une même charge, en raison inverse du nombre des condensateurs, et pour un même potentiel proportionnelle à ce nombre.

Batterie en cascade. — Au lieu de grouper les bouteilles d'une même batterie comme nous venons de l'indiquer, on peut encore faire communiquer l'armature extérieure de l'une avec l'armature intérieure de l'autre, et ainsi de suite (fig. 370). L'armature intérieure de la première est mise en relation avec la source S , de potentiel V , et l'armature extérieure de la dernière communique avec le sol dont le potentiel est 0. Ce mode de groupement a reçu le nom de groupement en *cascade*. On démontre que, si les bouteilles ainsi associées ont même capacité C , la capacité de la batterie est en raison inverse du nombre n de ces bouteilles et que l'énergie de la batterie est alors donnée par les formules :

$$W = \frac{1}{2} \frac{nQ^2}{C} = \frac{1}{2} \frac{CV^2}{n}.$$

On obtient donc, relativement à la variation de l'énergie de la batterie avec le nombre des bouteilles, des résultats inverses des

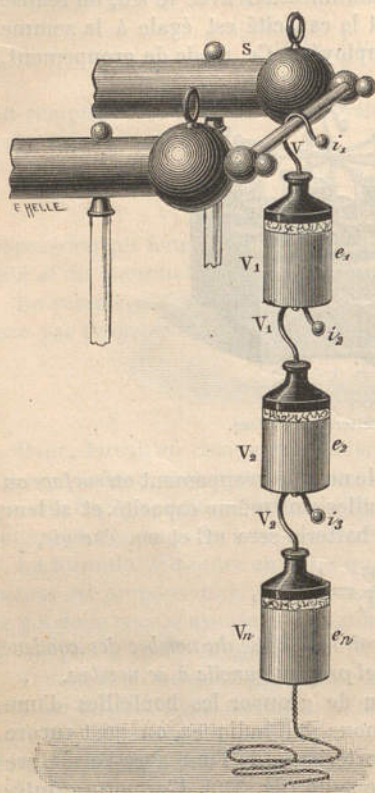


Fig. 370. — Batterie en cascade.

que l'on désire en prenant un nombre convenable de bouteilles.

On peut réaliser des modes de groupement intermédiaires aux précédents ; si l'on dispose par exemple de mn bouteilles, on peut les associer en surface par groupes de m et monter ensuite en cascade les n groupes ainsi formés. Ce mode de groupement est dit *mixte*.

précédents : pour une même charge, l'énergie est proportionnelle au nombre des bouteilles, tandis qu'elle est inversement proportionnelle à ce nombre pour un même potentiel.

Toutefois, alors même que l'on dispose d'une source à potentiel constant, il peut y avoir avantage à adopter le groupement en cascade si le potentiel de la source a une valeur telle qu'une seule bouteille ne pourrait le supporter sans se briser. Dans le groupement en cascade, tel que nous l'avons décrit, la différence de potentiel des deux armatures d'une même bouteille n'est plus en effet V , comme dans le cas d'une bouteille unique ou d'une batterie en surface dont les armatures externes sont au sol, mais $\frac{V}{n}$, e_n désignant par

n le nombre des bouteilles identiques associées. On peut donc affaiblir cette différence de potentiel dans le rapport

630. **Décharges d'un condensateur.** — On peut décharger un condensateur brusquement ou lentement.

a. — La décharge brusque s'obtient en faisant communiquer les deux armatures entre elles par l'intermédiaire d'un corps conducteur. On se sert généralement pour cela de deux tiges métalliques, articulées en A (fig. 371) par une de leurs extrémités et terminées à l'autre par une boule également métallique. Cet appareil a reçu le nom d'*excitateur*. Sur chaque tige est en général fixé un manche de verre M, M' qui permet de tenir l'excitateur sans le mettre en communication avec le sol. Pour décharger le condensateur on doit d'abord mettre une boule de l'excitateur en communication avec son armature externe et approcher l'autre boule de l'armature interne jusqu'à ce qu'il jaillisse une étincelle.

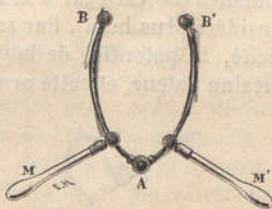


Fig. 371. — Excitateur.

Si l'on recommence la même manœuvre après un instant, on obtient, même lorsque les deux boules de l'excitateur ont été amenées au contact des deux armatures, une seconde étincelle, moins longue et moins bruyante que la première. La communication métallique des deux armatures n'avait donc pas suffi pour ramener le condensateur à l'état neutre. Ce phénomène trouve son explication dans la charge résiduelle ou pénétration de l'électricité par les deux faces du diélectrique (§ 626).

On peut du reste mettre en évidence l'existence de la charge résiduelle à l'aide d'une bouteille de Leyde *démontable* (fig. 372), c'est-à-dire d'une bouteille, dont les trois parties A, C, V, armatures et diélectrique, sont indépendantes et s'emboîtent les unes dans les autres. Les trois parties étant emboîtées, comme on le voit à gauche de la figure, on charge la bouteille, puis on la prend par son armature externe A, on la porte sur un support isolant, on sépare ses trois parties, et l'on met chacune de ses deux armatures A et C en communication avec le sol de façon à les ramener à l'état neutre tandis que le vase en verre V reste isolé; si l'on reconstitue alors la bouteille, on obtient avec l'excitateur une étincelle presque aussi forte que si l'on n'avait pas déchargé les deux armatures.

b. — La décharge lente s'obtient en isolant le condensateur et mettant alternativement chaque armature en communication avec

le sol. En reliant d'abord l'armature intérieure ou collecteur au sol, on lui enlève une quantité m d'électricité telle que son potentiel devienne nul; si l'on supprime alors la communication du collecteur avec la terre et que l'on mette au sol le condensateur, on enlève à celui-ci la quantité m' d'électricité sur laquelle m agissait par influence (m' est égal à m dans le cas du condensateur sphérique considéré plus haut). Par suite du départ de la quantité m' d'électricité, le potentiel de la première armature acquiert alors une certaine valeur, et cette armature, si elle est mise au sol, laisse de

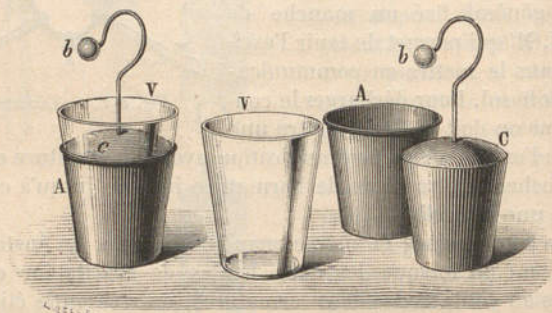


Fig. 372. — Bouteille de Leyde démontable.

nouveau écouler une certaine quantité d'électricité, et ainsi de suite.

Diverses expériences sont basées sur la décharge lente des condensateurs; nous ne décrirons ici que l'une des plus simples, celle du *carillon électrique*. L'armature interne d'une bouteille de Leyde est terminée par un timbre, l'armature externe est en communication avec un second timbre placé en face du précédent et un petit pendule métallique isolé est suspendu entre les deux. Quand la bouteille est chargée, ce pendule est alternativement attiré par chaque armature et décharge lentement la bouteille en portant d'un timbre à l'autre l'électricité dont il s'est chargé à chacun de ses contacts.

CHAPITRE IV

MACHINES ÉLECTROSTATIQUES. — EFFETS DES DÉCHARGES ÉLECTRIQUES

631. **Machines à frottement et machines à influence.** — On appelle *machine électrique* ou *électromoteur* toute source continue d'électricité. Les diverses sources d'électricité peuvent être divisées en plusieurs catégories suivant la nature de l'énergie à laquelle est due la production de l'électricité; mais chacune de ces sources a, en somme, pour effet d'établir une différence de potentiel entre deux conducteurs A et B.

Si nous supposons que les conducteurs A et B soient réunis par un troisième conducteur C, il se produira dans celui-ci un écoulement d'électricité destiné à rétablir l'égalité de potentiel entre A et B. Mais la machine, qui est une source continue d'électricité, maintient A et B à des potentiels différents; il y aura donc le long de C un écoulement continu d'électricité ou un *courant électrique*.

Au point de vue des effets que peut produire ce courant, et en particulier des usages thérapeutiques de l'électricité, il y a lieu de distinguer l'ensemble des électromoteurs en deux catégories: les uns peuvent établir entre les conducteurs A et B, lorsque ceux-ci sont isolés l'un de l'autre, une très grande différence de potentiel, le débit du courant qui traverse le conducteur C, c'est-à-dire la quantité d'électricité qui s'écoule à travers ce conducteur, étant relativement faible; les autres électromoteurs, au contraire, ne peuvent établir entre A et B, supposés isolés, que de faibles différences de potentiel, la quantité d'électricité qui s'écoule par seconde à travers le conducteur intercalaire C étant par contre considérable.

Nous ne nous occuperons actuellement que des électromoteurs de la première catégorie, qui ont reçu le nom de *machines électrostatiques*. Ces machines peuvent être divisées en deux groupes: dans les unes, en effet, appelées *machines à frottement*, c'est le travail dépensé pour frotter deux corps l'un contre l'autre qui est transformé en électricité; dans les autres, qui ont reçu le nom de *machines à influence*, la différence de potentiel réalisée est due au travail nécessaire pour déplacer un corps influencé en présence d'un corps influençant.

632. **Machines à frottement.** — Ce sont les premières machines électriques réalisées. Ces machines doivent avoir de grandes dimensions si l'on veut qu'elles soient puissantes; d'autre part, elles fonctionnent très mal par les temps humides, aussi sont-elles à peu près abandonnées, en particulier pour les usages médicaux, depuis la découverte des machines à influence. Nous nous bornerons donc à décrire sommairement ici l'un des types les plus connus, la machine de Ramsden.

Dans cette machine, un plateau de verre, mû au moyen d'une

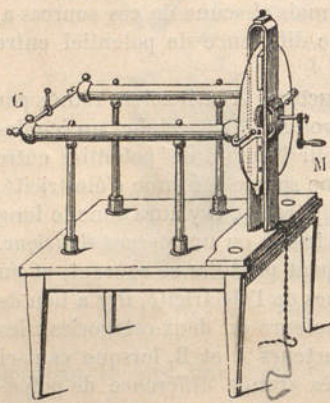


Fig. 373. — Machine de Ramsden.

manivelle M (fig. 373), frotte entre deux paires de coussins en cuir rembourrés dont la surface est rendue conductrice par de l'or mussif (bisulfure d'étain) ou par un amalgame de zinc et d'étain; les deux paires de coussin sont diamétralement opposées et communiquent avec le sol par une chaîne conductrice. Deux bras métalliques en forme de fer à cheval, munis intérieurement de pointes, embrassent le plateau sans le toucher et sont disposés suivant un diamètre perpendiculaire à celui sur lequel se trouvent les coussins. Ces bras, qui ont

reçu le nom de *peignes*, constituent les extrémités postérieures de deux conducteurs métalliques isolés sur des pieds en verre. Les extrémités antérieures de ces deux conducteurs sont terminées en boule et reliées par une tige métallique.

Lorsque le plateau est mis en mouvement, il s'électrise positivement par frottement tandis que l'électricité négative, développée simultanément sur les coussins, s'écoule dans le sol. L'électricité positive du plateau décompose alors par influence le fluide neutre des deux conducteurs isolés, l'électricité positive s'accumule dans la région la plus éloignée du plateau, c'est-à-dire vers l'extrémité C, tandis que l'électricité négative s'écoule par les pointes du peigne et vient neutraliser l'électricité positive des points du plateau que la rotation amène successivement en face de ces pointes.

Si les conducteurs étaient rigoureusement isolés, la charge de

la machine serait limitée par l'étincelle qui peut jaillir entre ses conducteurs et les frottoirs qui sont au sol. Mais, comme l'air et les pieds en verre ne sont pas des isolants parfaits, surtout par les temps humides, le fonctionnement de la machine est le plus souvent limité par l'égalité qui s'établit entre la quantité d'électricité mise en liberté sur les conducteurs pendant un temps donné et celle que ces mêmes conducteurs perdent pendant le même temps.

Pour augmenter la charge des conducteurs on augmente leur capacité en leur donnant une grande surface ; on peut également mettre les conducteurs en communication avec l'armature interne d'un condensateur dont l'autre armature communique avec le sol.

Afin d'être renseigné sur le potentiel auquel sont portés les conducteurs de la machine, on fixe généralement sur l'un d'eux un *électromètre de Henley* ; cet appareil (fig. 374) est constitué par un pendule en sureau, dont la tige conductrice A est elle-même articulée à l'extrémité B d'une seconde tige également conductrice C qui peut être fixée verticalement sur la machine. Le pendule chargé d'électricité de même nom que la tige C s'écarte d'autant plus de cette tige que le potentiel de la machine est plus élevé et l'angle d'écart se mesure sur un demi-cercle gradué dont le centre est en B ; on démontre d'ailleurs que le sinus de cet angle est proportionnel au carré du potentiel.

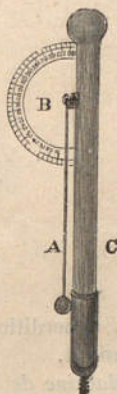


Fig. 374. — Electromètre de Henley.

633. **Machines à influence.** — *Électrophore.* — L'électrophore, la plus simple des machines à influence, est constitué par un gâteau de résine ou d'ébonite HH (fig. 375) et par un disque métallique P muni d'un manche isolant S. On frotte avec une peau de chat le gâteau de résine qui s'électrise ainsi négativement et sur lequel on place alors le disque métallique : celui-ci s'électrise par influence et on lui enlève l'électricité négative développée en le mettant en communication avec le sol. Cette communication rompue, le disque reste chargé d'une certaine quantité d'électricité positive qu'il emporte avec lui quand on le soulève. Comme du reste la charge du gâteau n'a nullement varié du fait de cette série d'opérations, on peut recommencer après avoir déchargé le

disque et obtenir une nouvelle charge théoriquement identique à la première. En réalité la charge va toujours diminuant, à cause

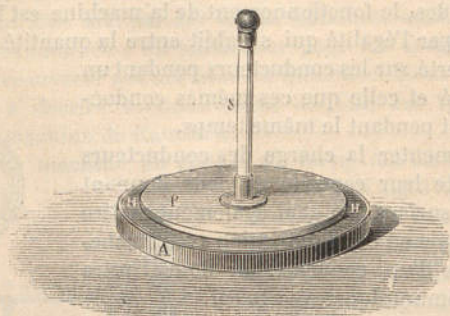


Fig. 373. — Électrophore.

des déperditions du gâteau par ses supports et par l'air environnant.

Machine de Carré. — Elle se compose de deux plateaux A et B (fig. 376) l'un plus petit, l'autre plus grand, dont les plans et les axes de rotation sont parallèles et qui sont disposés de telle sorte que la partie inférieure de l'un des plateaux soit constamment en regard de la partie supérieure de l'autre, sans pourtant la toucher; une courroie permet d'ailleurs d'actionner, au moyen d'une seule manivelle M, les deux plateaux qui tournent en sens inverse. En face de la partie inférieure du grand plateau B et vis-à-vis le petit plateau A se trouve un peigne E en relation avec un conducteur isolé T. Du même côté du grand plateau B et à l'extrémité du même diamètre se trouve un second peigne F en relation avec un second conducteur C.

Le plateau A, généralement en verre, s'électrise positivement par frottement entre les deux coussins D, analogues à ceux de la machine de Ramsden, et agit par influence sur le conducteur T dont les parties les plus éloignées se chargent dès lors d'électricité positive, tandis que l'électricité négative s'écoule constamment par les pointes du peigne E sur la face en regard du plateau A; celui-ci, grâce à son mouvement de rotation, apporte donc constamment en face du peigne F cette électricité négative qui agit par influence sur le conducteur C. Ce conducteur se charge par suite

négativement, tandis que de l'électricité positive, s'écoulant par les pointes du peigne F, vient neutraliser l'électricité négative du plateau. Les deux conducteurs se trouvent ainsi chargés d'électri-

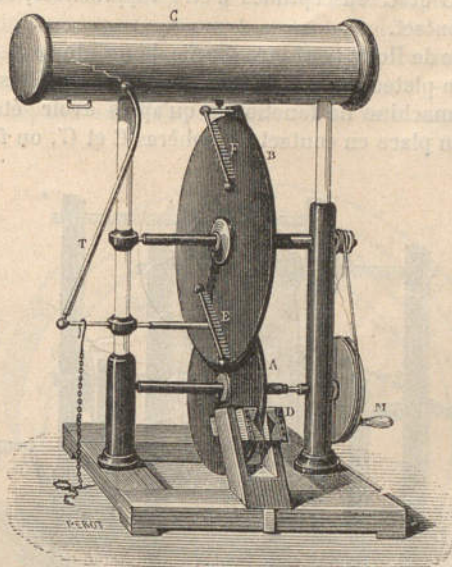


Fig. 376. — Machine de Carré.

cités de noms contraires et leurs charges augmentent jusqu'à ce qu'une étincelle jaillisse entre leurs deux extrémités.

On peut également relier le conducteur T au sol comme le montre la figure.

Machine de Holtz. — Cette machine se compose d'un plateau de verre VV (fig. 377), auquel on peut donner un mouvement rapide de rotation au moyen de la manivelle B, et d'un plateau VV' maintenu fixe grâce aux traverses isolantes A, A, A, A. Le plateau fixe est muni de deux fenêtres O, O' diamétralement opposées: le long du bord supérieur de l'une des fenêtres et du bord inférieur de l'autre, sont collées des bandes de papier fort, qui forment les armatures et portent chacune une pointe p, p' dont l'extrémité s'avance librement dans l'ouverture de la fenêtre correspondante. De l'autre côté du plateau fixe, et en regard des armatures, sont

disposés deux peignes métalliques I, I' armés de dents fines et nombreuses et réunis à deux conducteurs isolés dont les extrémités sont traversées par deux tiges métalliques mobiles que terminent les sphères C et C' susceptibles d'être rapprochées, éloignées ou placées en contact.

La machine de Holtz peut être munie de un, de deux ou de quatre couples de plateaux, les uns fixes, les autres mobiles.

Une telle machine ne fonctionne qu'après avoir été amorcée. A cet effet, on place en contact les sphères C et C', on fait tourner

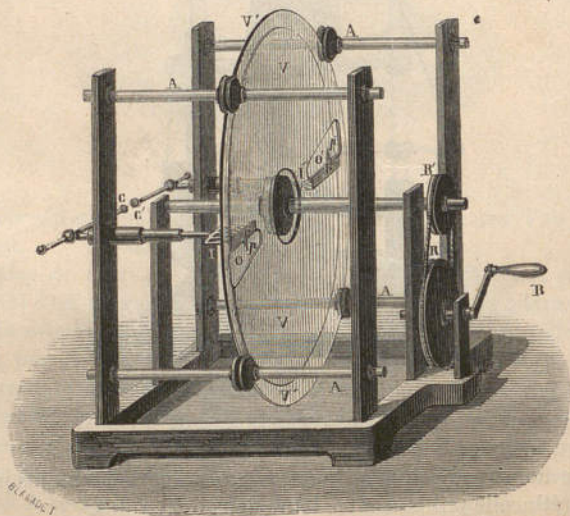


Fig. 377. — Machine de Holtz.

le plateau mobile, et l'on approche de l'une des armatures une plaque d'ébonite préalablement frottée et par conséquent chargée d'électricité négative; un bruissement particulier avertit que l'amorcement est réalisé. En écartant alors les sphères C et C', on voit jaillir entre elles une série indéfinie d'étincelles, si l'on continue à faire tourner le plateau mobile; mais la machine se décharge et doit être amorcée de nouveau si la distance des sphères C et C' est trop grande.

Pour donner la théorie sommaire de cette machine, il est com- mode de supposer qu'elle est formée, non de plateaux, mais de cy-

lindres de verre et de considérer ce qui se passe dans un plan perpendiculaire à l'axe (fig. 378). La flèche indique le sens dans lequel tourne le cylindre mobile.

L'armature P, électrisée négativement par la plaque d'ébonite, agit par influence sur le peigne I, attire le fluide + qui se répand, pendant la première demi-révolution du cylindre mobile MM', sur une moitié de sa face interne et repousse le fluide - qui, par le peigne I', se répand sur l'autre moitié de la face interne du même

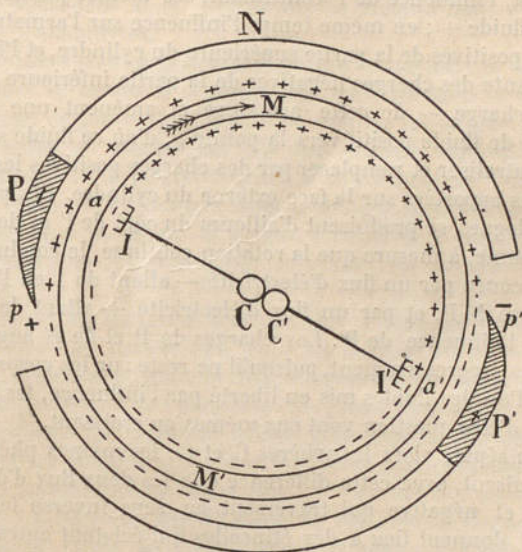


Fig. 378. — Théorie de la machine de Holtz.

cylindre. Ces charges, positives et échelonnées en IMI, négatives et distribuées en I'MI, agissent à leur tour par influence sur les armatures; les premières attirent le fluide - vers la base de l'armature P et repoussent le fluide + vers la pointe p d'où il s'écoule en se répandant sur la moitié supérieure de la face externe du cylindre; les secondes décomposent de même le fluide neutre de P', attirent le fluide + vers la base de cette armature et repoussent vers la pointe p' le fluide - qui se répand sur la moitié inférieure de la face externe du cylindre. Les charges négatives de P et posi-

tives de P' augmentent donc pendant la première demi révolution; l'influence de ces armatures sur le conducteur II' va également en croissant, et la charge positive du cylindre mobile augmente donc de I' en I sur la moitié supérieure, de même que la charge négative augmente de I en I' sur la moitié inférieure.

Pendant la demi-révolution suivante, les armatures continuent à agir sur le conducteur II' . Le fluide $+$ qui s'écoule par I neutralise le fluide $-$ des points du cylindre qui passent alors devant ce peigne et, l'influence de P continuant, ces mêmes points se chargent de fluide $+$; en même temps l'influence sur l'armature P des charges positives de la partie supérieure du cylindre, et l'influence concordante des charges négatives de la partie inférieure augmentent la charge $-$ de cette armature et amènent une nouvelle quantité de fluide positif vers la pointe p , d'où ce fluide s'échappe pour neutraliser et remplacer par des charges positives les charges négatives apportées sur la face externe du cylindre. Des phénomènes analogues se produisent d'ailleurs du côté de I' et de P' .

En somme, à mesure que la rotation continue, le conducteur II' sera parcouru par un flux d'électricité $-$ allant de I en I' , et dû à l'influence de P , et par un flux d'électricité $+$ allant de I' vers I et dû à l'influence de P' . Les charges de P et de P' augmentant d'ailleurs progressivement, puisqu'il ne reste sur les corps influencés que l'un des fluides mis en liberté par l'influence, les flux dont il vient d'être question vont eux-mêmes en croissant.

Si l'on sépare alors les sphères C et C' , les mêmes phénomènes se produisent, avec cette différence que les deux flux d'électricité positive et négative qui traversent en sens inverse le conducteur II' donnent lieu à des étincelles qui éclatent entre C et C' , au moment où la différence des potentiels atteint la valeur correspondant à la distance explosive à laquelle ces sphères se trouvent.

Si la distance entre C et C' est trop grande, il n'éclate plus d'étincelles entre ces sphères; C reste alors chargé de fluide $-$ qui empêche l'influence de P sur I de se manifester. Le fluide négatif de la moitié inférieure du cylindre, qui n'est plus détruit, passe alors au delà de I et chasse la charge négative de P vers la pointe p , d'où elle s'écoule. L'armature P est ainsi ramenée à l'état neutre: il est en de même de l'armature P' , et la machine cesse de fonctionner.

Ordinairement les conducteurs C et C' sont munis chacun d'une

bouteille de Leyde, dont les armatures extérieures communiquent entre elles; ces bouteilles forment ainsi une cascade. Comme les armatures intérieures se chargent d'ailleurs, l'une d'électricité positive, l'autre d'électricité négative, les armatures extérieures sont de même chargées de fluides de noms contraires. L'adjonction de ces bouteilles a pour effet d'augmenter la capacité des conducteurs de la machine. L'étincelle continue à éclater lorsque la différence des potentiels en C et C' atteint la valeur qui correspond à une distance explosive égale à la distance des sphères. Les étincelles se succèdent alors avec moins de rapidité mais elles sont beaucoup plus nourries.

Si les sphères sont trop éloignées et que la machine se décharge, celle-ci peut se ramorcer d'elle-même, mais les pôles + et — ont alors changé de place. Cela tient à ce que les armatures internes des bouteilles se déchargent par les peignes correspondants; comme d'ailleurs le peigne I reçoit à ce moment de l'électricité négative venue de l'armature interne de la bouteille à laquelle il est réuni et que de même le peigne I' reçoit de l'électricité positive, on voit que les nouveaux pôles sont les inverses des précédents.

La machine de Holtz est très sensible à l'humidité du milieu ambiant, aussi lui préfère-t-on, pour les usages médicaux, la machine de Wimshurst, dont le fonctionnement est beaucoup plus assuré. La possibilité de l'inversion des pôles, dans la machine de Holtz, constitue une seconde raison pour rejeter l'usage de cet électromoteur; en effet, si, comme le pensent plusieurs auteurs, les actions thérapeutiques des deux espèces d'électricités ne sont pas identiques, il importe que le signe de l'électricité employée ne change pas à l'insu de l'observateur. Il convient d'ajouter que l'inversion des pôles peut être empêchée grâce à un conducteur diamétral, muni de peignes à ses deux extrémités et isolé du conducteur II. Le conducteur diamétral ne joue aucun rôle tant que la machine fonctionne normalement; lorsque les sphères C et C' sont trop éloignées, au contraire, le conducteur diamétral joue le même rôle que II lorsque les sphères C et C' sont en contact.

Machine de Voss. — Cette machine, qui s'amorce d'elle-même, se compose, comme celle de Holtz, d'un plateau fixe G' (fig. 379) et d'un plateau mobile G, sur lequel sont disposées six pastilles métalliques g. Deux feuilles de papier, ou *armatures*, que l'on aperçoit par transparence en aa', sont collées sur la face du plateau fixe

opposée au plateau mobile; chacune de ces feuilles est en partie recouverte par une bande d'étain terminée à l'une de ses extrémités par une pastille métallique; un arc métallique A ou A' terminé par un petit balai également métallique, met à chaque instant en communication cette pastille avec celles du plateau mobile qui viennent successivement passer devant elle. Une tige métallique l' l''', munie à chacune de ses extrémités d'un peigne et d'un balai contre lequel viennent frotter les pastilles du plateau mobile, établit en outre la communication entre les pastilles dia-

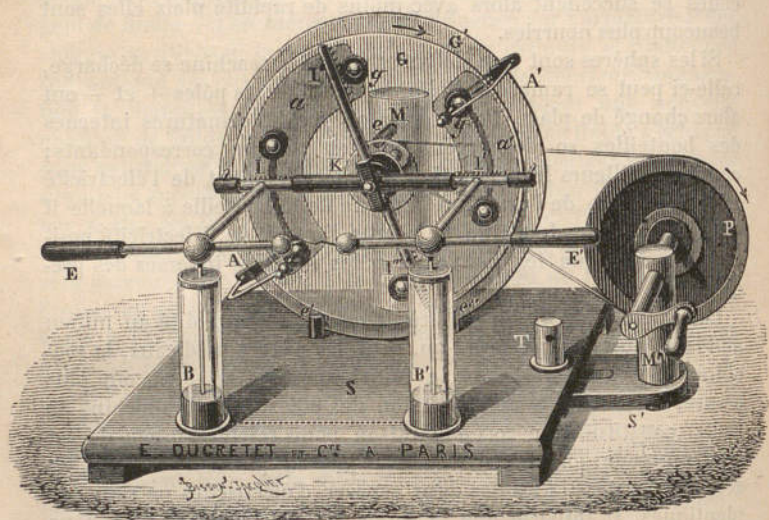


Fig. 379. — Machine de Voss.

métralement opposées au moment où elles sont soumises aux influences des deux armatures a et a' qui tendent à leur donner des charges inverses. Pour comprendre le fonctionnement de la machine, il faut en effet supposer que les deux armatures sont dès le début à des états électriques différents. Dès lors la pastille influencée par l'armature a , et par suite chargée d'électricité de même nom que l'armature a' , augmente la charge de cette armature a' , lorsqu'elle est mise en communication avec elle par l'intermédiaire de l'arc métallique A'; il en est de même pour la pastille influencée par a' et l'armature a . Les deux armatures

agissent, d'autre part, par influence, sur les deux conducteurs métalliques isolés I, I' munis de peignes à l'une de leurs extrémités et terminés à l'autre par deux boules que des manches isolants E, E' permettent de rapprocher ou d'éloigner à volonté. L'électricité qui s'écoule par les peignes ramène à l'état neutre les pastilles qui passent devant leurs pointes, tandis que les électricités de noms contraires s'accroissent sur les deux boules en regard jusqu'à ce que l'étincelle éclate.

On augmente la capacité des conducteurs à l'aide de bouteilles de Leyde B, B'.

Machine de Wimshurst. — C'est, de toutes les machines à influence, celle dont le fonctionnement est le plus régulier; aussi est-elle la plus couramment employée dans la pratique électrothérapique.

Cette machine est formée de deux plateaux P, concentriques et

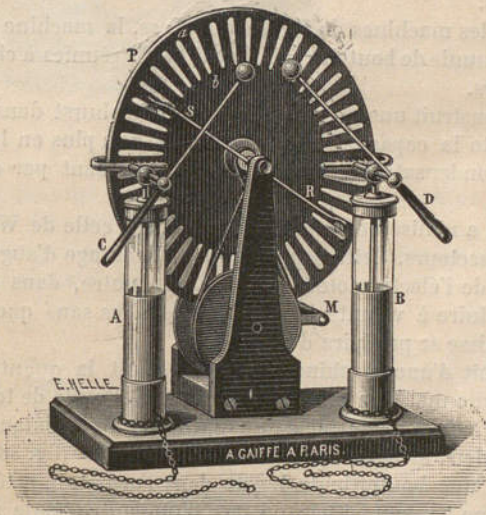


Fig. 380. — Machine de Wimshurst.

de même rayon (fig. 380), qui tournent en sens inverse, au moyen d'une manivelle M, et sont munis de secteurs saillants *ab*, recouverts d'étain, qui se détachent en blanc sur la figure. Deux peignes en fer à cheval sont disposés aux extrémités d'un même diamètre

des plateaux et réunis à deux conducteurs terminés par de petites sphères, que des manches isolants C, D permettent d'amener au contact ou d'éloigner l'une de l'autre. Enfin deux conducteurs diamétraux, dont un seul SR est visible sur la figure, sont disposés symétriquement par rapport à la verticale et terminés par de petits balais métalliques qui frottent contre les secteurs.

La théorie de la machine de Wimshurst n'est pas exactement connue; comme la machine de Voss, cette machine s'amorce d'elle-même et il faut encore supposer, pour en comprendre le fonctionnement, que les conducteurs sont, au début, à des états électriques un peu différents entre eux. Chacun de ces conducteurs agit alors par influence sur les balais les plus rapprochés; de là résultent, d'une part, l'électrisation des secteurs avec lesquels ces balais sont successivement en contact, d'autre part, de nouveaux phénomènes d'influence qui s'exercent entre ces secteurs et les peignes.

Comme les machines de Holtz et de Voss, la machine de Wimshurst est munie de bouteilles de Leyde A, B, réunies à chacun des conducteurs.

Gaiffe construit une machine du type Wimshurst dans laquelle il augmente la capacité des conducteurs, non plus en les munissant de condensateurs, mais en les constituant par deux gros cylindres.

Bonnetti a réalisé une machine analogue à celle de Wimshurst, mais sans secteurs. Cette suppression a l'avantage d'augmenter la puissance de l'électromoteur; on peut, en outre, dans cette machine, produire à volonté l'inversion des pôles sans que cette inversion puisse se produire d'elle-même.

634. **Débit d'une machine.** — Le débit est la quantité d'électricité qu'une machine peut fournir pendant l'unité de temps.

On peut mesurer le débit d'une machine en réunissant ses deux pôles aux deux armatures d'une bouteille de Lane (fig. 384); on appelle ainsi une bouteille de Leyde dont l'armature extérieure est réunie à une boule n située en face d'une autre boule m qui termine l'armature intérieure; ces boules peuvent être placées, grâce à une vis micrométrique v , à une distance déterminée l'une de l'autre. La différence de potentiel nécessaire pour faire jaillir une étincelle entre les deux boules, et par suite pour décharger la bouteille à travers l'air, dépend de la valeur donnée à la distance de ces boules; pour une même distance explosive d et une même

(1) La théorie est exactement connue comme il résulte de la suppression des secteurs, d'ailleurs, les effets sont les mêmes.

bouteille de Lane, cette différence de potentiel V étant constante, chaque étincelle entraîne la même quantité Q d'électricité et cette quantité est égale à celle que fournit la machine dans l'intervalle de deux étincelles consécutives ⁽¹⁾. Il suffit donc de compter le nombre n des étincelles que donne la bouteille par secondes pour en

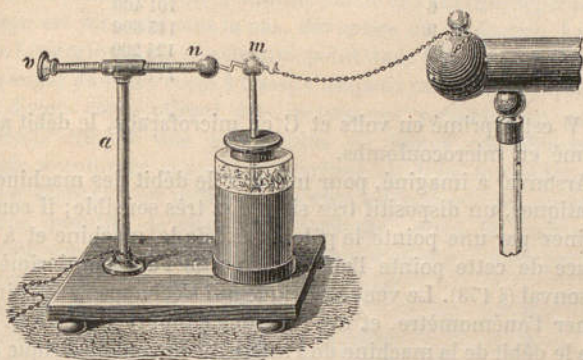


Fig. 381. — Bouteille de Lane.

déduire la quantité d'électricité fournie par la machine en une seconde ou le débit nQ de cette machine.

Si l'on désigne par C la capacité, préalablement déterminée, de la bouteille de Lane, on a :

$$Q = CV;$$

le débit de la machine sera donc :

$$nQ = nCV.$$

Le potentiel V correspondant à la distance explosive d est d'ailleurs donné par les nombres de la page 884, ou par les suivants, qui ont été déterminés par Mascart et qui sont relatifs à des sphères de 22 millimètres de diamètre :

⁽¹⁾ En réalité il n'en est ainsi qu'après les premières étincelles, lorsque la charge résiduelle du diélectrique de la bouteille a acquis une valeur constante.

Distance explosive en centimètres.	Différence de potentiel en volts.
0.1	5 400
0.5	26 730
1	48 600
1.5	57 000
3	76 800
6	101 400
9	115 800
12	124 200
15	127 800

Si V est exprimé en volts et C en microfarads, le débit nCV est exprimé en microcoulombs.

D'Arsonval a imaginé, pour mesurer le débit des machines électrostatiques, un dispositif très simple et très sensible; il consiste à terminer par une pointe le pôle inactif de la machine et à placer en face de cette pointe l'anémomètre de l'anémocalorimètre de d'Arsonval (§ 173). Le vent électrique qui s'échappe de la pointe fait tourner l'anémomètre, et des relations simples permettent de déduire le débit de la machine de l'intensité du vent électrique qu'elle produit.

Le débit des machines à influence est plus élevé que celui des machines à frottement; il augmente avec la vitesse de rotation et diminue quand la différence de potentiel augmente.

L'énergie électrique engendrée par une machine en une seconde est (§ 628) :

$$W = \frac{1}{2} VQ,$$

Q étant le débit ou la quantité d'électricité écoulée pendant une seconde et V la différence de potentiel correspondant à la distance sous laquelle les étincelles éclatent.

Si V est exprimé en volts et Q en coulombs, nous avons dit (§ 628) que l'énergie W était exprimée en fonction d'une unité appelée *joule*. Le temps intervenant ici, puisque Q est le débit par seconde, on donne alors à l'unité le nom de *watt*. Le *watt* est donc la *puissance* d'une source électrique qui fournit une énergie d'un *joule* par seconde.

635. Effets des décharges électriques. Décharge disruptive et décharge conductive. — Lorsqu'on décharge un conducteur A électrisé en approchant de celui-ci un autre conducteur B relié au sol, ou qu'on décharge un condensateur en réunissant les deux arma²

tures, l'énergie accumulée sur le conducteur électrisé ou sur le condensateur se dépense pour produire des effets divers lumineux, calorifiques, mécaniques, chimiques, etc.

On observe toujours une étincelle pendant la décharge et cette étincelle peut, suivant les conditions dans lesquelles elle se produit, représenter la majeure ou la minime partie de l'énergie dépensée ; la décharge est dite, suivant le cas, *disruptive* ou *conductive*. La portion de l'énergie qui ne se retrouve point dans l'étincelle a d'ailleurs été dépensée dans les corps à travers lesquels est passée la décharge.

Les divers corps offrent des résistances variables au passage de l'électricité, et une partie plus ou moins considérable de l'énergie accumulée dans le conducteur ou dans le condensateur que l'on décharge est utilisée à vaincre cette résistance en produisant une quantité de chaleur équivalente ; aussi la longueur de l'étincelle est-elle, toutes choses égales d'ailleurs, plus petite ou plus grande suivant que cette résistance est elle-même plus grande ou plus petite.

Les lois suivant lesquelles varie la résistance d'un corps seront étudiées plus loin à propos des courants ; nous nous bornerons à ajouter ici que la résistance d'un corps augmente avec sa longueur et diminue quand la section augmente.

Effets lumineux de la décharge. — Ces effets, qui s'observent avec le plus d'intensité dans la décharge disruptive, se présentent, soit sous forme d'*étincelle*, trait lumineux, rectiligne s'il est court, en zigzags et présentant des ramifications s'il est long, soit sous forme d'*aigrette*, sorte de nappe lumineuse pâle et violacée qui prend naissance lorsque la distance explosive augmente, soit encore sous forme de *lueurs* ; celles-ci se montrent lorsque la décharge a lieu dans un gaz raréfié, et l'on peut facilement les observer, soit avec l'œuf électrique (fig. 382), soit avec les tubes de Geissler que nous étudierons plus loin.

Pour une même différence de potentiel, la longueur de l'étincelle, en décharge disruptive, dépend de la forme des conducteurs entre lesquels elle éclate.

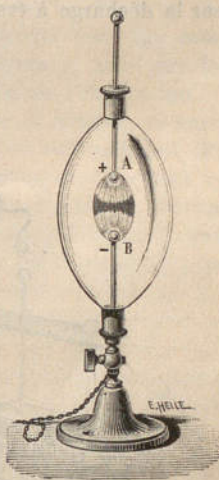


Fig. 382. — Œuf électrique.

La différence de potentiel nécessaire pour produire entre deux conducteurs une étincelle de longueur donnée dépend de même de la forme de ceux-ci. C'est ce que montrent les nombres trouvés par divers observateurs et entre autres les suivants dus à Baille :

Distance explosive.	Différences de potentiel en volts entre deux conducteurs plans.	Différences de potentiel en volts entre deux conducteurs sphériques de rayons égaux entre eux et a		
		3 c.m.	1 c.m.	0 c.m. 1
c.m.				
0.05	2682	2754	2754	2889
0.10	4410	4497	4575	4830
0.15	6060	6141	6384	5874
0.20	7626	7785	8034	6573
0.25	9114	9399	9630	6933
0.30	10605	10977	11196	7236
0.50	16305	16488	16398	9000
1	31647	31407	24915	10872

Effets calorifiques. — Pour observer ces effets, il faut faire passer la décharge à travers un fil métallique assez court et très fin,

en disposant ce fil entre deux tiges métalliques qui servent à provoquer la décharge. Une grande partie de l'énergie de cette décharge, qui est alors conductive, est employée à élever la température du fil dont la résistance est très grande et celui-ci peut être porté au rouge et même volatilisé.

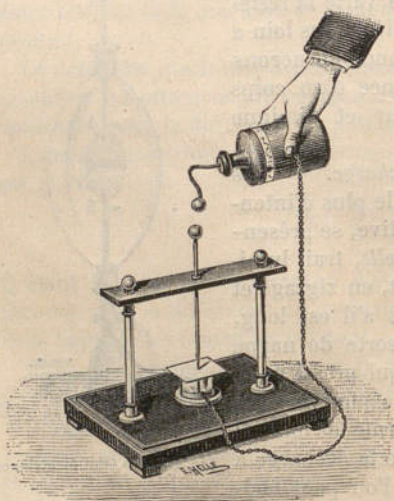


Fig. 383. — Expérience du perce verre.

Effets mécaniques. — Si l'on fait passer la décharge à travers un corps mauvais conducteur, une lame de carton ou de verre par exemple, ce corps est percé ou brisé, une partie de l'énergie de la décharge se transformant en travail mé-

canique. La figure 383 montre la disposition de l'expérience. Le corps mauvais conducteur est placé entre les extrémités appointées

de deux tiges métalliques dont les autres extrémités sont mises en relation avec les armatures d'un condensateur par exemple.

Effets chimiques. — L'énergie de la décharge peut encore être partiellement employée à produire des combinaisons ou des décompositions, entre autres la combinaison de l'oxygène avec l'hydrogène ou l'azote, la transformation de l'oxygène en ozone, la décomposition du gaz ammoniac, etc.

Enfin, la décharge peut également produire des effets physiologiques et thérapeutiques; l'étude de ces effets est du ressort de la Physique biologique.

CHAPITRE V

DE LA PILE ET DU COURANT ÉLECTRIQUE

636. *Expériences de Galvani et de Volta.* — L'expérience exécutée par Galvani en 1789 sur la grenouille constitue un fait trop important dans l'histoire des progrès de l'Électricité pour que nous ne rappelions pas sommairement cette expérience, ainsi que les hypothèses qui furent imaginées pour en donner l'explication.

Après avoir enlevé la peau d'une grenouille et dénudé ses nerfs lombaires, Galvani constata que les muscles se contractaient violemment, lorsqu'on les mettait en communication avec les nerfs au moyen d'un arc formé de deux métaux, zinc et cuivre. Galvani attribua ces contractions à l'électricité, et pensa que la production de cette électricité se faisait dans la grenouille, qu'il assimilait à un condensateur dont les nerfs et les muscles représentaient les armatures interne et externe, et dont la charge était due aux forces vitales; l'arc métallique jouait simplement le rôle d'un excitateur.

Volta, tout en admettant que les contractions étaient bien dues à l'électricité, localisait la source de cette électricité, non dans la grenouille même, mais dans le contact des deux métaux qui formaient l'arc métallique. Pour justifier sa théorie, Volta imagina l'électroscope condensateur, que nous avons déjà décrit, et entreprit toute une série d'expériences dont quelques-unes méritent d'être rapportées.

Deux plateaux, l'un de zinc, l'autre de cuivre, munis d'un manche isolant par lequel on pouvait les tenir, étant mis en contact à l'état neutre, puis séparés l'un de l'autre, Volta constatait que le zinc était électrisé positivement et le cuivre électrisé négativement.

Dans une autre expérience, Volta, tenant à la main, par son extrémité zinc, une lame constituée par deux morceaux de zinc et de cuivre soudés bout à bout, mettait le cuivre en communication avec le plateau inférieur de l'électromètre, tandis que de l'autre main il mettait le plateau supérieur en communication

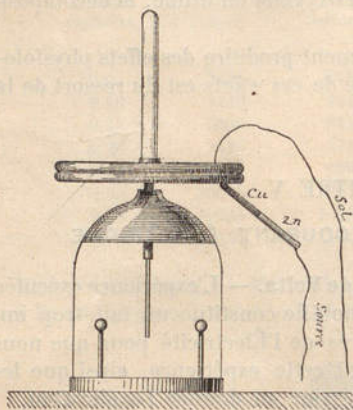


Fig. 384. — Expérience de Volta.

avec le sol (fig. 384); il supprimait ensuite les communications, enlevait le plateau supérieur de l'électromètre, et constatait que les feuilles d'or divergeaient et étaient chargées d'électricité négative. Volta concluait de là qu'une force électromotrice existait au contact des deux métaux, que le zinc, en communication par son corps avec le sol, était à l'état neutre, tandis que le cuivre se chargeait d'électricité négative.

La même expérience répétée en tenant le cuivre à la main et mettant le zinc en contact

avec le plateau en cuivre de l'électromètre, ne donna lieu à aucune divergence des feuilles d'or; Volta expliquait ce fait en remarquant qu'il y avait alors deux contacts zinc-cuivre dont les effets devaient mutuellement se détruire.

Fabroni n'admit pas la théorie de Volta, et attribua la production d'électricité aux actions chimiques qui devaient prendre naissance au contact du zinc et des liquides organiques de la grenouille dans l'expérience de Galvani, au contact du zinc et des liquides acides dus à la transpiration de la main dans la seconde expérience de Volta.

Les progrès réalisés depuis 1789 ont montré que chacune des trois hypothèses précédentes correspond à des faits réels.

On démontre, en effet, en Physique biologique, qu'il peut exister une différence de potentiel entre les muscles et les nerfs d'un même animal; d'autre part, il résulte d'expériences précises qu'une différence de potentiel se manifeste au contact de deux métaux différents; enfin, nous verrons plus loin que les actions

chimiques sont une source énergétique d'électricité; c'est, d'ailleurs, cette dernière cause qui intervient dans la plupart des expériences rapportées plus haut.

637. **Force électromotrice de contact.** — Tout circuit traversé par un courant, d'origine d'ailleurs quelconque, présentant forcément un certain nombre de contacts de corps différents, il est nécessaire, au début de ce Chapitre, d'indiquer d'abord les faits principaux relatifs à la différence de potentiel que ce contact détermine.

Lorsque deux métaux en contact sont en équilibre électrique, chacun d'eux est à un potentiel constant, mais la valeur de ce potentiel diffère de l'un à l'autre. On appelle *force électromotrice* la cause qui produit et maintient une telle différence et c'est la valeur de cette différence que l'on prend pour mesure de cette force. Les expressions de *force électromotrice* et de *différence de potentiel* peuvent donc être regardées comme équivalentes.

Une différence analogue de potentiel existe également entre un métal et un liquide au contact; mais cette différence est beaucoup moins grande qu'entre deux métaux, et devient sensiblement nulle lorsque le métal est en contact avec une solution de l'un de ses sels.

L'expérience montre que la différence de potentiel due au contact, différence qui varie avec la nature et la température des corps en présence, est indépendante de l'étendue des surfaces qui se touchent.

On constate en outre, par l'observation, que *la différence de potentiel de deux métaux séparés par une chaîne continue d'autres métaux est la même que si ces métaux étaient directement en contact*, pourvu, toutefois, que la température soit la même en tous les points de la chaîne. Cette loi a reçu le nom de *loi des contacts successifs*.

638. **Condition générale de production d'un courant électrique.**

— Si l'on considère une chaîne fermée constituée par deux métaux A et B, la force électromotrice de contact ne peut y donner naissance à un mouvement continu d'électricité, c'est-à-dire à un *courant*, car il y aurait alors production de travail sans dépense d'énergie, ce qui serait contraire au principe de la conservation de l'énergie. La différence de potentiel $A|B$ que l'on observe en passant de A à B, doit donc être égale et de signe contraire à la différence $B|A$ que l'on observe en passant de B à A, ce que l'on peut traduire par l'égalité :

$$A|B = -B|A.$$

Il ne peut, de même, se produire un courant dans un circuit formé de plusieurs métaux et dont toutes les parties sont à la même température. C'est là, en effet, une conséquence de ce que nous venons de dire, ainsi que de la loi des contacts successifs.

Il se produit, au contraire, un courant si l'une des surfaces de contact des métaux du circuit est maintenue à une température plus élevée que les autres; mais, dans ce cas, c'est l'énergie fournie à la surface de contact sous forme de chaleur qui se transforme en énergie électrique. Les électromoteurs, que nous étudierons par la suite sous le nom de *piles thermo-électriques*, sont basés sur ce principe.

Il se produit de même un courant lorsque le circuit, au lieu d'être entièrement métallique, comprend un liquide capable d'attaquer l'un des métaux avec lesquels il est en contact, et ce fait a été utilisé dans la construction d'un autre groupe d'électromoteurs, les *piles hydro-électriques*. Des réactions chimiques prennent, dans ce cas, naissance au contact des métaux et du liquide, et l'on doit considérer ces réactions ou la force électromotrice de contact comme l'origine du courant, selon que l'on admet que la loi des contacts successifs est ou non applicable au cas où le circuit comprend des liquides. Quoi qu'il en soit, ce sont les réactions chimiques qui fournissent l'énergie nécessaire à l'entretien du courant.

En rapprochant ce qui précède de ce qui a déjà été signalé à propos des machines électrostatiques et de ce que nous verrons par la suite, on peut dire qu'il ne se produit un courant dans un circuit que s'il existe dans ce circuit une source d'énergie. Cette source d'énergie peut être un travail dynamique, comme dans les machines électrostatiques, qui, nous l'avons vu, ne peuvent fournir que des courants excessivement faibles, ou comme dans les machines d'induction, que nous étudierons plus tard, et qui fournissent des courants infiniment plus puissants; elle peut consister aussi en une élévation de température ou en une réaction chimique, comme dans les cas que nous avons indiqués dans ce paragraphe.

639. **Couples et piles hydro-électriques.** — On appelle *couple* ou *élément de pile hydro-électrique* un électromoteur constitué par deux conducteurs de nature différente plongés dans un même liquide ou dans deux liquides différents en contact l'un avec l'autre et dont l'un au moins attaque l'un des métaux. Les deux conducteurs sont appelés *électrodes* et les liquides *électrolytes*. Aux deux électrodes se

trouvent fixés deux fils ou deux tiges du même métal, qui constituent les deux *pôles* du couple.

Nous avons dit, dans le paragraphe précédent, que l'action chimique entretient entre les deux pôles une différence de potentiel qui présente d'ailleurs, lorsque le couple est en état d'équilibre électrique, une valeur constante. Le pôle qui est au potentiel le plus élevé est appelé le *pôle positif*; celui dont le potentiel est le plus bas est le *pôle négatif*; la valeur de la différence de potentiel sur les deux pôles lors de l'état d'équilibre représente la *force électromotrice* de l'élément.

Lorsqu'on réunit les deux pôles par un conducteur, il s'établit dans ce conducteur un courant électrique; l'énergie de ce courant est empruntée, comme nous l'avons indiqué tout à l'heure, aux actions chimiques qui se produisent au contact des électrodes avec les électrolytes et qui sont alors continues.

La différence de potentiel qui existe entre les deux pôles d'un élément est toujours très faible, par rapport à celle qui existe entre les deux pôles d'une machine électrostatique, et n'atteint guère que deux volts dans les éléments où elle est la plus forte; aussi doit-on, pour mettre cette différence de potentiel en évidence, avoir recours à des instruments sensibles, l'électroscope condensateur par exemple. Par contre, le débit d'un élément de pile, c'est-à-dire la quantité d'électricité qui circule pendant une seconde dans un conducteur établissant la communication entre les deux pôles, est très considérable. Ces caractères sont exactement inverses de ceux des machines électrostatiques, qui réalisent une différence de potentiel très considérable aux pôles, mais qui n'ont qu'un faible débit.

640. Force électromotrice de plusieurs éléments associés en série ou en tension. — On peut augmenter la différence de potentiel fournie par des éléments de pile en réunissant convenablement plusieurs de ces éléments.

Dans le premier appareil de ce genre imaginé par Volta, les divers couples, constitués par des disques métalliques et des rondelles de drap imbibées d'acide sulfurique, étaient empilés les uns sur les autres; de là le nom de *pile hydro-électrique*, ou plus simplement de *pile*, donné à cet électromoteur et, par extension, aux électromoteurs de la même catégorie imaginés depuis lors.

L'utilité de l'association de plusieurs éléments résulte de la loi suivante, dont on peut vérifier l'exactitude avec l'électromètre à quadrans par exemple.

La différence de potentiel e qui existe entre les deux pôles d'un élément ne dépend que de la nature des corps en contact; elle est indépendante de la valeur absolue du potentiel auquel on peut amener l'un de ces pôles.

Il résulte de cette loi que, si le pôle négatif d'un élément communique avec une source électrique, d'ailleurs quelconque, de potentiel V , ce pôle négatif prendra ce potentiel, et le pôle positif aura un potentiel $V+e$.

Supposons dès lors que n éléments de pile, dont les forces électromotrices sont respectivement égales à $e_1, e_2, e_3, \dots, e_n$, soient associés entre eux, de telle sorte que le pôle positif de chacun d'eux soit réuni au pôle négatif du suivant; admettons, en outre, ce qui peut d'ailleurs se faire dans la pratique, que les pôles de ces divers éléments soient tous constitués par un même métal, de façon qu'aucune différence de potentiel ne puisse naître de leur contact. Supposons encore, pour plus de généralité, que le pôle négatif, resté libre, de l'élément qui se trouve à l'une des extrémités de la pile soit mis en communication avec une source électrique de potentiel V . Le potentiel du pôle positif de ce premier élément sera, en vertu de la loi précédente, $V+e_1$ et le pôle négatif du second élément, qui communique métalliquement avec ce pôle positif, se mettra à ce même potentiel $V+e_1$; le pôle positif du second élément sera, par suite, au potentiel $V+e_1+e_2$ et ainsi de suite. Le potentiel V' du pôle positif, resté libre, du dernier élément, sera donc :

$$\begin{aligned} V' &= V + e_1 + e_2 + e_3 + \dots + e_n; \\ \text{d'où :} \quad V' - V &= e_1 + e_2 + e_3 + \dots + e_n. \end{aligned} \quad (1)$$

Donc : *La différence de potentiel $V' - V$ des deux pôles extrêmes, ou la force électromotrice de la pile, est égale à la somme des forces électromotrices des éléments associés.*

Si les n éléments associés ont même force électromotrice e , la force électromotrice de la pile devient :

$$V' - V = ne; \quad (2)$$

elle est alors proportionnelle au nombre des éléments qui la constituent.

Les formules (1) et (2) sont encore vraies quels que soient le nombre et la nature des métaux qui réunissent les électrodes de deux éléments consécutifs; en effet, d'après la loi des contacts

successifs, la différence de potentiel de ces électrodes sera toujours la même que si ces électrodes étaient directement en contact, et par suite que si elles étaient, comme nous l'avons supposé d'abord, réunies par deux fragments d'un même métal.

Le mode de groupement que nous venons d'étudier, et qui porte le nom de *groupement en série* ou *en tension*, n'est d'ailleurs pas le seul suivant lequel plusieurs éléments puissent ou doivent même être associés; nous indiquerons plus loin (§ 645) les divers modes d'association que l'on peut réaliser, lorsque nous pourrions indiquer en même temps les avantages qu'ils présentent et les circonstances dans lesquelles on doit les employer.

641. Sens et intensité d'un courant. — Nous avons défini (§ 631) ce que l'on entendait par courant électrique, et nous avons déjà indiqué (§ 638) les conditions générales nécessaires à la production d'un tel courant. Tous les électromoteurs, quelle que soit leur nature, sont capables de donner naissance à des courants électriques, et si nous faisons ici l'étude de ces courants à propos de la pile, c'est que la pile, en raison de l'intensité et de la régularité de son débit, constitue l'électromoteur qui se prête le mieux à l'étude des lois qui régissent les courants.

On convient de définir le *sens* d'un courant par le sens suivant lequel se propage l'électricité positive; la force qui agit sur cette électricité étant d'autre part toujours dirigée du point où le potentiel est le plus élevé vers celui où il l'est moins, le sens d'un courant sera toujours celui des potentiels décroissants.

Lorsqu'on réunit les deux pôles d'une pile par un conducteur, il s'effectue, du pôle positif vers le pôle négatif à travers le conducteur, un transport d'électricité positive qui tend à égaliser la différence de potentiel existant entre ces deux pôles; mais la pile tend à maintenir cette différence par un transport d'électricité positive dans l'intérieur de la pile de l'électrode négative sur l'électrode positive, si bien que le sens du courant est en réalité du pôle positif au pôle négatif à l'extérieur de la pile et du pôle négatif au pôle positif à l'intérieur.

On appelle *intensité* d'un courant la quantité d'électricité qui passe, pendant une seconde, à travers une section quelconque du circuit fermé traversé par le courant.

Cette définition suppose que l'intensité du courant est la même en tous les points du circuit; or il en est bien ainsi, car si, par l'un des procédés que nous indiquerons plus loin, on mesure, en

un point quelconque de ce circuit, l'un des effets que peut produire le courant, on trouve que la quantité d'effet produit est indépendante de la position du point où on la mesure.

Si l'on désigne par q la quantité d'électricité qui traverse une section quelconque du circuit en t secondes, l'intensité I du courant sera donnée par la formule :

$$I = \frac{q}{t},$$

en admettant que le courant soit constant pendant le temps t .

L'unité électrostatique C.G.S. d'intensité est l'intensité du courant tel qu'il passe une unité électrostatique C.G.S. d'électricité pendant chaque seconde à travers toute section du circuit le long duquel ce courant circule.

Cette unité étant trop petite pour les besoins de la pratique, on lui substitue une autre unité, appelée *ampère*, qui est l'intensité du courant qui fait écouler 1 coulomb pendant chaque seconde à travers une section quelconque du circuit traversé par ce courant. L'ampère vaut donc 3×10^9 unités électrostatiques C.G.S. d'intensité.

L'ampère est une intensité trop grande pour les besoins de la pratique médicale; aussi les médecins emploient-ils une autre unité, qui est la millième partie de la précédente, et à laquelle on donne en conséquence le nom de *milliampère*.

642. **Lois d'Ohm.** — Ces lois s'appliquent à tous les courants, quels que soient les électromoteurs qui les fournissent; elles ont été établies théoriquement par Ohm et expérimentalement par Pouillet. Aujourd'hui on peut démontrer ces lois au moyen de l'électromètre.

Disons d'abord que, si l'on mesure la différence de potentiel entre deux points déterminés d'un circuit dans lequel circule un courant, en mettant respectivement ces deux points en communication avec les deux paires de quadrans d'un électromètre, on trouve que cette différence de potentiel est constante dans le temps, si l'on ne produit aucune modification dans le circuit.

a. — Soit maintenant une portion de circuit, homogène et de section uniforme; si l'on mesure la différence E des potentiels de deux points situés, sur cette portion du circuit, à une distance l l'un de l'autre, on trouve que E est proportionnel à l , de telle sorte que l'on peut écrire :

$$E = al,$$

a étant une constante.

b. — Considérons en second lieu, dans un même circuit, deux parties (fig. 385) formées d'une même substance mais dont les sections soient différentes ; si l'on mesure la différence E des poten-



Fig. 385. — Lois d'Ohm. Variation de la force électromotrice avec la section du conducteur.

tiels des couples de points A et B, A' et B', situés sur l'une et sur l'autre de ces parties et tels que $AB = A'B'$, on trouve que E est inversement proportionnel à la section correspondante s du conducteur ; on a donc :

$$E = \frac{b}{s}$$

b étant une constante.

c. — Soit enfin un conducteur interpolaire MN (fig. 386) qui se bifurque en B en deux conducteurs identiques de nature, de lon-

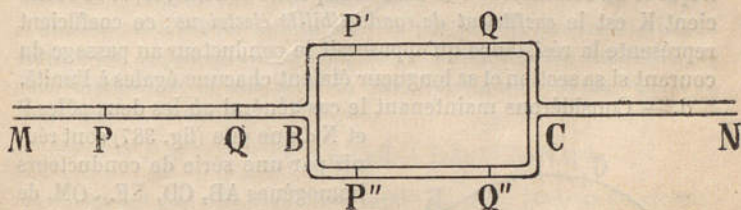


Fig. 386. — Lois d'Ohm. Variation de la force électromotrice avec l'intensité.

gueur et de section, lesquels se réunissent au point C en un conducteur unique. Il est évident, par raison de symétrie, que la quantité d'électricité, dont l'écoulement constitue le courant, se divisera en B en deux parties égales et que, pendant un temps donné, la quantité d'électricité qui traverse une section de $BP'Q'C$ ou de $BP''Q''C$ sera moitié de celle qui traverse, pendant le même temps, une section de MB ou de CN. En d'autres termes, l'intensité du courant en MB ou en CN sera double de l'intensité en $BP'Q'C$ ou en $BP''Q''C$. Or, si l'on mesure la différence E des potentiels de deux points P et Q, puis la différence E' des potentiels de deux autres points P', Q' ou P'', Q'', tels que $PQ = P'Q' = P''Q''$, on trouve que $E = 2E'$. On trouverait de même, dans le cas où MB se bifurque, au point B, en trois, quatre, ... conducteurs identiques,

que $E=3E'$, $E=4E'$,... La différence des potentiels entre deux points est donc proportionnelle à l'intensité du courant, et l'on peut écrire :

$$E = cI,$$

c étant une constante.

En résumé, la différence des potentiels entre deux points d'un conducteur traversé par un courant est proportionnelle à l'intensité du courant, proportionnelle à la distance de ces points et inversement proportionnelle à la section uniforme du conducteur entre ces mêmes points. Ces trois lois sont exprimées simultanément par la formule :

$$E = K \frac{l}{s} = K \frac{l}{s} I, \quad (1)$$

dans laquelle K est une constante qui dépend de la nature du conducteur.

L'expression $K \frac{l}{s}$ représente ce que l'on appelle la *résistance électrique* R du conducteur entre les deux points considérés, et le coefficient K est le *coefficient de conductibilité électrique*; ce coefficient représente la résistance qu'opposerait le conducteur au passage du courant si sa section et sa longueur étaient chacune égales à l'unité.

d. — Considérons maintenant le cas général où les deux pôles P

et N d'une pile (fig. 387) sont réunis par une série de conducteurs homogènes $AB, CD, EF\dots OM$, de natures diverses et placés bout à bout. Soient $r_1, r_2, r_3\dots r_n$ les résistances de chacun de ces conducteurs exprimées en fonction d'une même unité quelconque de résistance, et $e_1, e_2, e_3\dots e_n$ les différences de potentiel entre les points A et B, C et D, E et $F\dots O$ et M ; il résulte de ce qui précède que ces différences sont respectivement égales à $Ir_1, Ir_2, Ir_3\dots Ir_n$

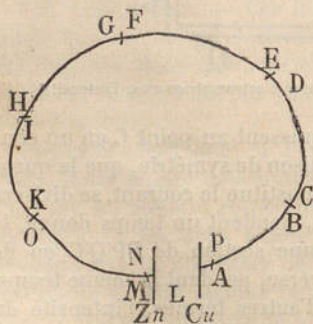


Fig. 387. — Lois d'Ohm. Cas général.

en désignant par I l'intensité du courant qui passe par le circuit. Si nous représentons par V le potentiel du pôle positif P , le potentiel du point A sera égal à $V + P | A$ en désignant par $P | A$ la force électromotrice qui prend naissance au niveau du contact

PA; en B, la valeur du potentiel ne sera plus que $V + P | A - Ir_1$; en C elle sera $V + P | A - Ir_1 + B | C$ et ainsi de suite, si bien que, si l'on désigne par V' la valeur du potentiel sur le pôle négatif N, on aura :

$$V + P|A - Ir_1 + B|C - Ir_2 + D|E - Ir_3 + F|G \dots - Ir_n + M|N = V',$$

d'où :

$$V - V' = Ir_1 + Ir_2 + Ir_3 \dots + Ir_n - (P|A + B|C + D|E + F|G \dots + M|N).$$

Mais, d'après la loi des contacts successifs (§ 637), la somme des différences de potentiel $P | A + B | C + D | E + F | G \dots + M | N$ est nulle, puisque, dans la chaîne métallique PABC...OMN, les deux métaux extrêmes qui constituent les deux pôles de la pile sont les mêmes; on a donc :

$$V - V' = E' = I(r_1 + r_2 + r_3 \dots + r_n) = IR, \quad (1)$$

en représentant par R la résistance totale de la portion du circuit extérieur comprise entre les deux pôles.

Si nous considérons maintenant la portion du circuit PCuLZ_nN formée par la pile que nous supposons constituée, par exemple, par une lame de zinc et une lame de cuivre plongées dans un liquide L, nous aurons de même :

$$V - V' = E' = P|Cu + Cu|L + L|Zn + Zn|N - Ir,$$

en désignant par r la résistance totale de cette portion du circuit; mais ici la somme $P | Cu + Cu | L + L | Zn + Zn | N$ n'est point nulle, elle constitue la force électromotrice E de la pile; on a donc :

$$E' = E - Ir, \quad (2)$$

d'où, en remplaçant E' par sa valeur tirée de (1) :

$$E = I(R + r); \quad (3)$$

de là on tire :

$$I = \frac{E}{R + r}. \quad (4)$$

Ce sont les lois représentées par cette formule (4) qui portent le nom de lois de *Ohm*; elles sont comprises dans l'énoncé suivant :

L'intensité d'un courant est égale au quotient de la force électromotrice de la pile qui le fournit par la résistance totale du circuit.

La formule (2) montre d'ailleurs que la différence de potentiel E' des deux pôles d'une pile dont le circuit est fermé, c'est-à-dire

dont les deux pôles sont reliés par un conducteur, est toujours moindre que la différence de potentiel E des deux pôles de la même pile en circuit ouvert.

643. **Unités de résistance.** — Si E représente la différence des potentiels aux extrémités d'un conducteur de résistance R qui est traversé par un courant d'intensité I , on a :

$$I = \frac{E}{R}.$$

Par suite, si $I = 1$ et $E = 1$, il vient $R = 1$. En conséquence :

L'unité électrostatique C.G.S. de résistance est celle d'un conducteur qui, lorsqu'il existe à ses deux extrémités une différence de potentiel égale à l'unité électrostatique C.G.S. de potentiel, est traversé par un courant dont l'intensité est égale à l'unité électrostatique C.G.S. d'intensité.

Cette unité de résistance est trop petite pour les besoins courants; aussi dans la pratique lui substitue-t-on une autre unité appelée *ohm*, qui est la résistance d'un conducteur tel qu'il soit traversé par un courant de 1 ampère lorsqu'il existe à ses deux extrémités une différence de potentiel de 1 volt. Si l'on exprime l'ampère et le volt par leurs valeurs en unités électrostatiques C.G.S. (§§ 618 et 641), on a :

$$3 \times 10^9 = \frac{1}{3 \times 10^9 \times R}$$

d'où : 1 *ohm* = $R = 9 \times 10^{11}$ unités électrostatiques C.G.S. de résistance.

644. **Puissance d'un électromoteur.** — Soit E la force électromotrice ou la différence des potentiels V et V' qu'un électromoteur maintient à ses pôles et I l'intensité du courant produit.

Nous avons dit (§ 641) que le courant pouvait être considéré comme résultant du transport d'un pôle à l'autre d'une quantité M d'électricité positive par seconde. Or nous avons vu que le travail électrique correspondant au transport d'une masse électrique M d'un point où le potentiel est constamment V en un point où le potentiel est constamment V' est égal à $M(V - V')$. Le courant considéré correspond donc à une quantité d'énergie égale à $I \times E$ par seconde.

Cette énergie Ei a reçu le nom de *puissance* de l'électromoteur ; on représente cette puissance par la lettre W . L'égalité

$$W = E \times I$$

montre que si $E = 1$ et $I = 1$, on a : $W = 1$.

En particulier, si $E = 1$ volt et $I = 1$ ampère, la valeur correspondante de W est appelée *watt*. Le watt est donc la puissance d'un électromoteur qui, avec une force électromotrice de 1 volt, débite 1 coulomb par seconde.

La quantité de travail appelée *watt* ne diffère de la quantité de travail appelée *joule* (§ 628) qu'en ce que le temps intervient dans la définition ; le watt est, en effet, un travail de 1 joule par seconde.

645. Groupement des électromoteurs. — La formule

$$I = \frac{E}{R + r}$$

montre que l'intensité du courant qui passe dans le circuit intermédiaire d'une pile dépend de la résistance R de ce circuit. Pour une même valeur de la résistance R , l'intensité du courant dépend de la force électromotrice et de la résistance intérieure r de la pile ; cette intensité augmente, si l'on augmente la force électromotrice ou si l'on diminue la résistance. Il résulte de là, comme nous allons le voir, que lorsqu'on dispose de plusieurs éléments, la valeur de l'intensité du courant fourni dans un circuit de résistance déterminée varie suivant la manière dont on associe ces éléments.

Soient, en effet (fig. 388), n éléments identiques de force électro-



Fig. 388. — Association de six couples en série ou en tension.

motrice e , associés en *tension* (§ 640) ; la différence de potentiel sur les deux pôles extrêmes, en circuit ouvert, sera égale à ne . Soient maintenant r la résistance commune à chaque élément et R celle du circuit intermédiaire ; le courant devant traverser successivement chacun des éléments lorsqu'on ferme le circuit, la résistance totale de ce circuit sera $R + nr$ et l'intensité du courant sera, par suite, donnée par la formule :

$$I = \frac{ne}{R + nr}. \quad (1)$$

Si, au contraire, on associe les n éléments en *surface* ou en *batterie* (fig. 389), c'est-à-dire de manière que les pôles positifs de chaque élément soient réunis entre eux et qu'il en soit de même

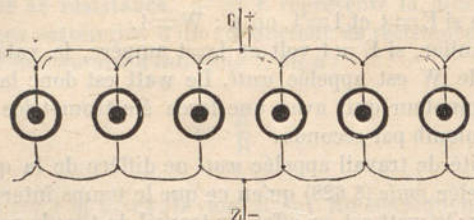


Fig. 389. — Association de six couples en batterie ou en surface.

de tous les pôles négatifs, on réalise un électromoteur unique de surface n fois plus grande. La force électromotrice e ne subit donc aucun changement, mais la résistance intérieure r devient $\frac{r}{n}$, puisqu'elle est en raison inverse de la section et que celle-ci est en somme devenue n fois plus grande.

L'intensité I du courant sera donc dans ce cas :

$$I = \frac{e}{R + \frac{r}{n}} = \frac{ne}{nR + r}. \quad (2)$$

On peut encore réaliser un groupement *mixte* : Imaginons, par exemple, que les n électromoteurs soient réunis (fig. 390 et 391) par groupes de p unités associées en séries, puis que toutes les séries en nombre m , ainsi réalisées, soient ensuite associées en batterie, et soit à calculer l'intensité obtenue dans ce cas.

Chacune des séries de p couples donnera un courant dont l'intensité sera $i = \frac{pe}{R + pr}$; d'après ce qui précède, l'association en batterie des m séries réalisées n'entraîne aucune modification de la force électromotrice, mais diminue la résistance dans le rapport de 1 à m . L'intensité résultante sera donc :

$$I = \frac{pe}{R + p\frac{r}{m}} = \frac{mpe}{mR + pr} = \frac{ne}{mR + pr}. \quad (3)$$

Les figures 390 et 391 représentent deux exemples différents de groupement mixte de six couples.

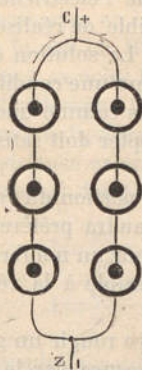


Fig. 390. — Association en batterie de deux séries formées chacune de trois couples.

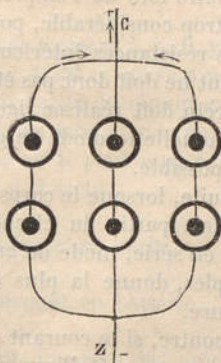


Fig. 391. — Association en batterie de trois séries formées chacune de deux couples.

Les formules (1), (2) et (3) conduisent à des conséquences très importantes en ce qui concerne le mode de groupement à choisir dans les diverses circonstances où l'on peut avoir à utiliser le courant fourni par un nombre n de couples que l'on a à sa disposition.

On doit, en effet, dans tous les cas, se proposer d'obtenir, avec le nombre de couples dont on dispose, l'intensité la plus grande possible. Le problème à résoudre est donc le suivant : Étant donnés n couples de résistance r , comment doit-on les associer pour que l'intensité du courant obtenu à travers un circuit extérieur de résistance connue R soit maxima ?

Nous n'indiquerons pas les calculs au moyen desquels on tire de la formule (3) la solution cherchée, et nous énoncerons seulement cette solution.

L'intensité est maxima si l'on réalise un groupement tel que la résistance intérieure totale des électromoteurs, déduite de leur mode de groupement, soit égale à la résistance extérieure.

Pour réaliser les conditions de l'intensité maxima dans chaque cas particulier, il faudrait donc déterminer préalablement la résistance extérieure, puis adopter chaque fois un groupement mixte différent. Mais il résulterait de là une complexité expérimentale à

laquelle on peut désirer se soustraire; en outre, la résistance du corps humain, qui constitue souvent une partie du conducteur intermédiaire lors de l'emploi thérapeutique de l'électricité, a une valeur trop considérable, pour qu'il soit possible de réaliser l'égalité des résistances intérieure et extérieure. La solution énoncée plus haut ne doit donc pas être regardée comme une condition que le médecin doit réaliser rigoureusement, mais comme une condition à laquelle le mode de groupement à adopter doit satisfaire le mieux possible.

Par suite, lorsque le corps humain, ou une portion du corps humain, fait partie du circuit extérieur, il faudra préférer l'association en série, mode de groupement qui, pour un nombre donné de couples, donne la plus grande valeur possible à la résistance intérieure.

Par contre, si le courant est employé à faire rougir un galvanocautère, corps métallique porté à l'incandescence par le passage du courant, la résistance extérieure est faible et inférieure à celle de chaque couple; pour satisfaire le mieux possible à l'égalité des résistances intérieure et extérieure, il faudra donc associer les n couples en batterie, car on diminue ainsi dans le rapport de 1 à n la résistance intérieure de la pile.

Il résulte encore de ce qui précède que, quand on a le choix entre divers couples de même force électromotrice mais de résistances intérieures inégales, on devra, si l'on doit faire passer le courant à travers le corps humain, préférer les couples dont la résistance est plus grande, et si l'on veut faire rougir un galvanocautère, donner la préférence aux couples dont la résistance est moindre.

Les conclusions générales qui précèdent sont d'ailleurs confirmées par les conséquences que l'on tire facilement des formules (1) et (2).

1° Si la résistance extérieure R est très grande par rapport à la résistance intérieure r , on peut négliger le terme en r dans les formules (1) et (2); il vient alors :

$$I = \frac{ne}{R} \quad \text{pour le groupement en série,}$$

$$I = \frac{ne}{nR} = \frac{e}{R} \quad \text{pour le groupement en batterie.}$$

Donc, avec le premier mode de groupement, l'intensité est proportionnelle au nombre des couples associés; avec le second mode

de groupement, au contraire, l'intensité est indépendante de n , c'est-à-dire qu'un couple unique donne la même intensité que n couples groupés en batterie.

Dans le cas où R est très grand par rapport à r , il y a donc avantage à associer les couples en série. C'est ce qui se présente en particulier lorsque le corps humain fait partie du circuit extérieur.

2° Lorsque la résistance intérieure r est très grande par rapport à la résistance extérieure R , le terme en R peut être négligé au dénominateur des formules (1) et (2), et il vient :

$$I = \frac{ne}{nr} = \frac{e}{r} \quad \text{pour le groupement en série,}$$

$$I = \frac{ne}{r} \quad \text{pour le groupement en batterie.}$$

Les résultats sont donc exactement inverses des précédents; l'intensité est indépendante du nombre des couples dans le groupement en série et proportionnelle à ce nombre, si les couples sont associés en batterie; il y a, par suite, avantage à choisir alors ce dernier mode de groupement; c'est ce qui se présente dans le cas où le courant est employé à porter un galvanocautère à l'incandescence.

646. **Courants dérivés.** — Nous n'avons considéré jusqu'à présent que le cas où le circuit interpolaire est unique; il importe d'étudier encore ce qui se passe lorsqu'un conducteur unique PA (fig. 392), traversé par le courant d'un électromoteur P, se divise au point A en deux ou plusieurs conducteurs distincts qui se réunissent en B pour aller aboutir, par un conducteur unique BP, au pôle négatif de l'électromoteur. Les courants tels que ACB, ADB, AEB sont dits *courants dérivés*.

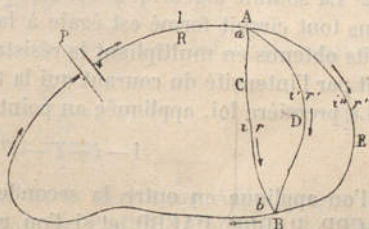


Fig. 392. -- Courants dérivés.

L'étude des courants dérivés intéresse le médecin et le physiologiste, soit par suite des dispositions expérimentales qu'ils peuvent avoir à réaliser et dans lesquelles existent des dérivations, soit par suite des indications que peut fournir cette étude, quant aux

points du corps sur lesquels il convient d'appliquer les pôles d'un électromoteur pour atteindre, par le courant, une région déterminée.

Soient E la force électromotrice, I l'intensité du courant principal dans les parties PA , BP , où le conducteur extérieur est unique, et i, i', i'' les intensités des courants dérivés ACB , ADB , AEB ; soient encore r, r', r'' , les résistances de ces circuits dérivés et R la résistance totale de PA , de BP et de l'électromoteur P . Proposons-nous de déterminer les intensités I, i, i', i'' .

La solution du problème repose sur la considération de deux lois, dites de Kirchhoff, dont l'une est évidente et dont l'autre peut être démontrée au moyen de considérations que nous ne reproduirons pas. Dans l'énoncé de ces lois, on regarde comme positives ou négatives les intensités des courants qui passent par un même point d'un circuit, suivant que ces courants s'approchent ou s'éloignent de ce point. De même, si plusieurs forces électromotrices existent dans un même circuit, ces forces sont affectées des signes $+$ ou $-$ suivant qu'elles donnent naissance à un courant dirigé dans un certain sens ou dans le sens inverse.

Les lois de Kirchhoff s'énoncent ainsi :

- 1° La somme algébrique des intensités de tous les courants qui passent par un même point d'un circuit est nulle ;
 2° La somme algébrique des forces électromotrices qui existent dans tout circuit fermé est égale à la somme algébrique des produits obtenus en multipliant la résistance de chaque partie du circuit par l'intensité du courant qui la traverse.

La première loi, appliquée au point A de la figure 392, donne :

$$I - i - i' - i'' = 0. \quad (1)$$

Si l'on applique en outre la seconde loi aux trois circuits fermés $PACBP$, $PADBP$, $PAEBP$, et si l'on remarque qu'il n'existe, dans chacun d'eux, que la force électromotrice E de l'électromoteur P , on aura :

$$(2) \quad \begin{cases} E = ir + IR & \text{pour le circuit fermé } PACBP \\ E = i'r' + IR & \text{—} & PADBP \\ E = i''r'' + IR & \text{—} & PAEBP. \end{cases}$$

On a ainsi 4 équations, d'où l'on tirera les valeurs de I, i, i', i'' si l'on connaît E, R, r, r', r'' . La résolution de ces équations ne présente aucune difficulté, mais les valeurs auxquelles on arrive

pour I, i, i', i'' sont assez complexes, et nous ne les reproduirons pas. Remarquons cependant que les équations (2) donnent :

$$i = \frac{E - IR}{r}, \quad i' = \frac{E - IR}{r'}, \quad i'' = \frac{E - IR}{r''};$$

ces expressions montrent que l'intensité I du courant principal se partage, dans les trois circuits partiels, par parties inversement proportionnelles à la résistance de chacun d'eux ; le courant partiel le plus intense sera donc celui qui circule dans le circuit partiel dont la résistance est moindre.

Dans le cas où la dérivation est constituée seulement par deux circuits partiels ACB (fig. 393) et ADB, on trouve pour I, i, i' les valeurs :

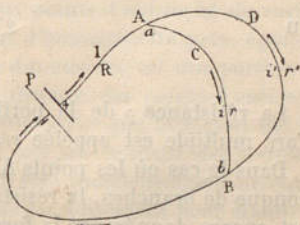


Fig. 393. — Courants dérivés, cas de deux circuits partiels.

$$I = \frac{E(r + r')}{Rr + Rr' + rr'}$$

$$i = \frac{Er'}{Rr + Rr' + rr'}$$

$$i' = \frac{Er}{Rr + Rr' + rr'}$$

L'intensité I du courant dans la partie non bifurquée peut se mettre sous la forme

$$I = \frac{E}{R + \frac{rr'}{r + r'}}, \quad (3)$$

tandis qu'avant l'établissement de la dérivation ACB, lorsque le circuit était seulement constitué par PADBP, l'intensité du courant dans la même région était donnée par la formule :

$$I = \frac{E}{R + r'}$$

L'établissement de la dérivation a donc eu pour effet d'augmenter l'intensité du courant dans la partie non bifurquée du circuit. Il est facile de se rendre compte de ce phénomène en remarquant que la résistance de l'arc multiple constitué par les deux branches ACB, ADB à travers lesquelles passe simultanément le courant,

est évidemment moindre que celle d'une seule des deux branches.

La formule (3) montre d'ailleurs que si l'on voulait remplacer l'arc multiple par une portion de circuit unique produisant le même effet, il faudrait que cette portion de circuit eut une résistance

$$\rho = \frac{rr'}{r+r'}$$

ou

$$\rho = \frac{1}{\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}}$$

La résistance ρ de la portion de circuit unique équivalente à l'arc multiple est appelée *résistance de l'arc multiple*.

Dans le cas où les points A et B sont reliés par un nombre quelconque de branches, la résistance de l'arc multiple ainsi constitué est encore donnée par la formule :

$$\rho = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots + \frac{1}{r_n}}$$

On peut dire en général que *la résistance d'un arc multiple est l'inverse de la somme des inverses des résistances de ses branches*.

647. Conducteurs à deux dimensions et à trois dimensions. — Lorsqu'un courant traverse un conducteur homogène à deux ou à trois dimensions, il se dissémine dans toute la masse conductrice, et le calcul, de même que dans certains cas l'expérience, montrent qu'il existe, à l'intérieur du conducteur, s'il est à trois dimensions, à sa surface, s'il n'a que deux dimensions, des surfaces ou des lignes équipotentiellles. La force électrique en un point étant normale à la ligne ou à la surface équipotentielle qui y passe, l'écoulement d'électricité doit se faire normalement à cette ligne ou à cette surface équipotentielle. En d'autres termes, le conducteur doit être regardé comme traversé par une infinité de courants partiels, allant de l'entrée à la sortie du courant principal, et dont les directions sont en tous leurs points perpendiculaires aux lignes équipotentiellles qu'elles rencontrent.

On conçoit d'ailleurs que l'intensité de ces courants partiels, rapportée à un fil de section invariable que l'on isole par la pensée à l'intérieur du conducteur, ne soit pas la même pour tous. C'est en effet ce qui arrive, et il est possible de calculer les intensités

relatives de ces divers courants partiels en lesquels on peut supposer que le courant principal est décomposé.

Le trajet de ces courants partiels et leur intensité relative varient d'ailleurs avec la position des points d'entrée et de sortie du courant principal dans le conducteur, points qui peuvent être eux-mêmes multiples. Si chacun de ces points est simple, les courants partiels les plus intenses sont évidemment ceux qui sont les plus voisins de la droite qui joint les deux points d'entrée et de sortie.

Ces considérations sont, au défaut d'homogénéité près, applicables au cas où le conducteur à trois dimensions est une portion du corps humain. Il faudra, par suite, disposer les points d'entrée et de sortie du courant principal de telle sorte que la région sur laquelle on veut faire agir le courant soit sur le trajet des courants partiels les plus intenses. Bergonié a très judicieusement invoqué, en Électrothérapie, les considérations qui précèdent pour établir la théorie et pour mettre en évidence les avantages et les inconvénients des divers procédés (nombre et positions des points d'entrée et de sortie du courant principal) utilisés dans le traitement par l'électrolyse des déviations de la cloison du nez; les observations cliniques ont d'ailleurs démontré à Bergonié l'exactitude de ses déductions théoriques.

Lorsque le conducteur à deux ou à trois dimensions n'est pas homogène, on peut dire, d'une manière générale, que les courants partiels sont plus intenses dans les parties dont la résistance est moindre.

CHAPITRE VI

ACTIONS CALORIFIQUES DES COURANTS ET PILES THERMO-ÉLECTRIQUES

648. **Loi de Joule.** — Représentons par E la différence de potentiel que l'on observe aux deux extrémités A et B d'une portion d'un conducteur traversé par un courant d'intensité I .

Nous avons vu (§ 644) que le travail électrique par seconde correspondant au passage du courant entre A et B est égal à EI ; si nous représentons donc par J le travail pendant le temps t , nous aurons ;

$$J = EIt.$$

Le travail J sera d'ailleurs exprimé en ergs si E et I sont eux-mêmes exprimés en unités C. G. S. de potentiel et d'intensité; par

contre, si E est exprimé en volts et I en ampères, c'est-à-dire en coulombs par seconde, J sera exprimé en joules; ce sont ces dernières unités que nous adopterons pour ce qui va suivre.

Le travail J effectué par le courant peut, du reste, être employé à produire, soit de la chaleur, soit des phénomènes de décomposition chimique; il peut également consister en un travail mécanique.

Nous nous occuperons dans ce Chapitre de la production de chaleur et, pour rechercher les lois de cette production, nous considérons le cas simple dans lequel les phénomènes calorifiques sont les seuls qu'engendre le courant par son passage entre A et B . Les lois en question résulteront immédiatement de l'expression qui fera connaître le nombre Q de calories-gramme-degré auquel est équivalent le travail EIt .

A cet effet, désignons par N le nombre de calories-gramme-degré correspondant au travail de 1 Joule; le nombre Q de calories-gramme-degré correspondant à un travail de EIt joules sera évidemment donné par la formule :

$$Q = NEIt. \quad (1)$$

Or, le joule valant exactement $\frac{1}{9.81}$ kilogrammètre, N sera le nombre de calories-gramme-degré qui correspond à $\frac{1}{9.81}$ kilogrammètre. En se souvenant que 425 kilogrammètres correspondent à 1 calorie-kilogramme-degré, c'est-à-dire à 1000 calories-gramme-degré, on voit facilement que $\frac{1}{9.81}$ kilogrammètre correspond à $\frac{1000}{425 \times 9.81} = \frac{1}{4.17}$ calories-gramme-degré. Si donc l'on porte cette valeur dans (1), à la place de N , on aura :

$$Q = \frac{EIt}{4.17} \text{ calories-gramme-degré.} \quad (2)$$

En tenant compte de la relation $E = RI$, donnée par les lois d'Ohm, l'expression précédente peut encore se mettre sous l'une des formes suivantes :

$$Q = \frac{E^2 t}{4.17 R}, \quad (3)$$

$$Q = \frac{RI^2 t}{4.17}. \quad (4)$$

C'est sous cette dernière forme que Joule a établi, par l'expérience, les lois du dégagement de chaleur par les courants, lois que nous venons d'établir théoriquement en partant de la considération du travail électrique et qui peuvent s'énoncer comme suit :

La quantité de chaleur dégagée pendant l'unité de temps dans un conducteur est proportionnelle au carré de l'intensité du courant et à la résistance du conducteur.

Mais cette loi ne s'applique qu'au cas d'un conducteur homogène dans lequel il ne se produit ni action chimique, ni travail intérieur.

Si l'on considère diverses parties d'un circuit extérieur satisfaisant aux conditions précédentes, la quantité de chaleur dégagée dans ce circuit sera égale à la somme des chaleurs dégagées dans chacune de ses parties et l'on aura, en désignant par I l'intensité du courant, par r_1, r_2, \dots, r_n les résistances de chacune de ces parties et par R la résistance totale du circuit :

$$Q = \frac{1}{4.17} (I^2 r_1 t + I^2 r_2 t + \dots + I^2 r_n t) = \frac{1}{4.17} T^2 R t.$$

Joule a trouvé, en outre, que la loi précédente s'applique également à la chaleur développée dans les piles, si l'on ne tient pas compte des productions de chaleur qui sont dues à des causes autres que l'action directe du courant.

Dans le cas où l'on considère, non plus une portion d'un circuit, mais un circuit complet, l'énergie totale de la pile sera transformée en chaleur si le circuit ne contient pas d'autre liquide que celui de la pile, et si le courant n'effectue aucun travail extérieur. La quantité totale de chaleur produite pendant le temps t est donc, dans ce cas, égale à $\frac{EIt}{4.17}$, en désignant maintenant par E la force électromotrice de la pile. Une partie de cette chaleur est du reste dégagée dans la pile, l'autre dans le circuit extérieur, et ces deux parties sont, d'après la loi de Joule, respectivement égales à $\frac{rI^2t}{4.17}$ et à $\frac{RI^2t}{4.17}$, si l'on désigne par r et par R les résistances de la pile et du circuit extérieur.

On voit que la presque totalité de la chaleur se dégage dans la pile ou dans le circuit intermédiaire, suivant que la résistance du circuit extérieur est négligeable par rapport à celle de la pile ou réciproquement.

649. **Élévation de température des conducteurs. Galvanocautères.** — La quantité de chaleur développée par le passage du courant a pour effet d'élever la température des conducteurs que le courant traverse. Cette température ira donc croissant jusqu'à ce que la quantité de chaleur que le conducteur perd par rayonnement et par conductibilité en une seconde soit égale à celle que le courant engendre dans le même temps. A partir de ce moment, la température du conducteur est stationnaire.

On démontre que cette température stationnaire est approximativement, pour une même intensité du courant, proportionnelle à la résistance spécifique du conducteur, en raison inverse du cube de son diamètre s'il est cylindrique, et indépendante de sa longueur. On démontre, d'autre part, que la température à laquelle est porté un même conducteur est sensiblement proportionnelle au carré de l'intensité du courant. Ces relations permettent de se rendre compte des faits observés dans les expériences suivantes.

Si l'on fait passer un courant d'intensité convenable à travers une chaîne constituée par des fils métalliques de même diamètre, mais de nature différente, platine et argent par exemple, on constate que les fils de platine, plus résistants, rougissent, tandis que les fils d'argent ne sont pas portés à l'incandescence.

Dans le cas où la chaîne est constituée par des fils de même nature, mais de diamètres différents, ce sont les fils fins qui rougissent et les gros qui restent obscurs.

Lorsque l'on intercale dans un circuit un fil de diamètre convenablement choisi et disposé de telle sorte que l'on puisse diminuer progressivement la longueur qui est traversée par le courant, on voit le fil s'échauffer de plus en plus, passer du rouge sombre au rouge vif et fondre même, à mesure qu'on diminue la longueur du fil comprise dans le circuit; ces faits résultent de ce que, en diminuant la longueur du fil, on diminue par cela même la résistance du circuit, et qu'on augmente par conséquent l'intensité du courant qui le parcourt.

Quand on refroidit, par immersion dans un liquide par exemple, une partie d'un circuit traversé par un courant, on observe dans les autres parties du même circuit une élévation de température; dans ce cas, la partie refroidie diminue de résistance et il en résulte encore un accroissement de l'intensité du courant qui parcourt le circuit.

On a fait de nombreuses applications de l'élévation considé-

nable de température qui résulte du passage d'un courant d'intensité convenable dans des conducteurs convenablement choisis. Nous ne citerons ici que l'emploi, très répandu aujourd'hui, des lampes électriques, dites à *incandescence*, sur lesquelles nous reviendrons d'ailleurs dans un autre Chapitre, et le fréquent usage que l'on fait, en chirurgie, d'un fil de platine porté à l'incandescence pour sectionner et cautériser les tissus; l'instrument employé à cet effet porte le nom de *galvanocautère*.

650. **Effet Peltier. Effet Thomson.** — Si l'on fait passer un courant dans un circuit formé de plusieurs métaux et que l'on mesure la quantité de chaleur dégagée entre deux points très voisins, situés à une très faible distance de part et d'autre d'une soudure métallique, on observe que cette quantité de chaleur, qui n'obéit plus alors à la loi de Joule, est plus grande ou plus petite que ne l'indique la formule (4) (§ 648), suivant le sens dans lequel on fait passer le courant. Il se produit donc, au niveau de la soudure, un dégagement ou une absorption de chaleur; on a donné à ce phénomène le nom d'*effet Peltier*, du nom du physicien qui l'a découvert. Nous ne pouvons insister ici sur l'interprétation de ce phénomène; nous dirons seulement que l'effet Peltier est en rapport avec la force électromotrice de contact qui prend naissance au niveau de la soudure et qu'il n'infirmé en rien la loi de Joule en ce qui concerne la quantité de chaleur créée par le passage même du courant dans le circuit. De même que la somme des forces électromotrices, autres que celles de la pile, est nulle dans un circuit fermé à température constante, de même la somme des effets Peltier est nulle dans le circuit total. La quantité de chaleur absorbée ou dégagée au niveau d'une soudure est dégagée ou absorbée au niveau d'une ou de plusieurs autres, et l'on n'observe en réalité que des phénomènes de transport de chaleur.

L'expérience suivante permet de mettre l'effet Peltier en évidence. On intercale dans un circuit un fil de fer entre deux fils de cuivre, et l'on plonge l'une des soudures fer-cuivre dans de l'eau à zéro, l'autre soudure dans la glace également à zéro. Si l'on fait alors passer un courant assez faible pour que l'effet Joule ne masque pas l'effet Peltier, et de telle façon que le courant aille du cuivre au fer dans la première soudure, on voit l'eau se congeler autour de cette soudure, tandis que la glace fond autour de la seconde à travers laquelle le courant se propage en allant du fer au cuivre; la quantité de glace fondue autour de l'une des soudures

est du reste égale à la quantité de glace formée autour de l'autre.

Thomson a observé qu'il se produit un effet analogue à l'effet Peltier quand un courant passe dans un fil dont les diverses parties ne sont pas à la même température ; l'origine du phénomène réside alors dans ce fait qu'une différence de température de deux parties consécutives d'un même fil suffit pour faire naître entre ces parties une différence de potentiel. Pour certains métaux, il y a absorption de chaleur lorsque le courant passe d'une région froide à une région plus chaude et dégagement de chaleur quand le courant se propage d'une région chaude à une région plus froide ; il y a donc en somme, transport de chaleur dans le sens du courant. Pour d'autres métaux au contraire, le transport de la chaleur se fait en sens contraire du courant ; avec le plomb enfin aucun transport ne peut être observé.

On a donné à ces phénomènes le nom d'*effet Thomson*.

651. **Courants thermo-électriques.** — Nous avons déjà dit (§ 638) que les forces électromotrices de contact ne pouvaient donner naissance à un courant dans un circuit formé de plusieurs métaux et dont toutes les parties étaient à la même température, mais qu'il se produisait au contraire un courant si l'une des surfaces de contact était maintenue à une température plus élevée que les autres.

C'est ici la chaleur qui fournit l'énergie nécessaire à la production de ces courants, découverts par Seebeck, et désignés sous le nom de *courants thermo-électriques*. Leur cause doit être cherchée dans la diversité de nature des corps métalliques réunis. On n'observe, en effet, aucune production de courant si l'on chauffe un point déterminé d'un fil métallique physiquement homogène, tandis qu'un courant se manifeste si le fil présente quelque modification de ses propriétés physiques (écrouissage, etc.) de part et d'autre du point chauffé ; il suffit par exemple, comme l'a montré Becquerel, d'enrouler en spirale une portion d'un fil de platine et de chauffer ce fil dans le voisinage de la spirale pour donner naissance à un courant. C'est l'enroulement du fil en spirale qui occasionne dans ce cas une modification de l'état moléculaire du fil dans la partie enroulée.

Si nous considérons un circuit fermé constitué par deux métaux A et B, et si nous chauffons l'une des soudures à une température déterminée, le courant qui se produit traverse la soudure chaude en allant de A vers B ou de B vers A suivant la nature des métaux A et B ; dans le premier cas, le métal A est dit positif par

rapport à B, et B négatif par rapport à A; c'est l'inverse dans le second cas.

Les métaux suivants sont rangés dans un ordre tel que chacun d'eux est positif par rapport à ceux qui le suivent et négatif par rapport à ceux qui le précèdent :

Bismuth.	Étain.	Zinc.
Nickel.	Plomb.	Fer.
Platine.	Cuivre.	Antimoine.
Argent.	Or.	

Toutes choses égales d'ailleurs, la force électromotrice obtenue E est d'autant plus grande que les deux métaux A et B sont plus éloignés dans la série précédente.

Pour deux métaux déterminés, la force électromotrice E dépend des températures t_1 et t_2 des deux soudures; mais la force électromotrice n'est, en général, proportionnelle à la différence $t_2 - t_1$ qu'entre de très faibles limites de température. Si l'on maintient constante la température t_1 de l'une des soudures, et que l'on élève progressivement la température t_2 de l'autre, on observe généralement que la force électromotrice croît progressivement d'abord, passe par un maximum, décroît ensuite jusqu'à devenir nulle, puis change de signe, le courant changeant par conséquent de sens; on dit alors qu'il y a *inversion*.

Pour deux métaux déterminés, la température t_m qui correspond au maximum de la force électromotrice est fixe et indépendante de la température t_1 de la soudure froide; mais la valeur maxima de la force électromotrice est d'autant plus faible que t_1 est plus voisin de t_m . La température t_i à laquelle se produit l'inversion dépend au contraire de la température t_1 de la soudure froide, et la valeur de la différence $t_i - t_m$ est toujours égale à $t_m - t_1$.

L'étude des phénomènes thermo-électriques, dont nous venons d'exposer les points principaux, est notablement simplifiée grâce à la loi suivante, dite des *métaux intermédiaires*, qui a pu être établie par l'observation.

Lorsque, dans un circuit, deux métaux A et B sont séparés par une chaîne de métaux intermédiaires à température constante t, la force électromotrice est la même que si les deux métaux A et B étaient réunis directement et si leur surface de contact était portée à la température t:

On pourra donc indifféremment souder deux métaux A et B directement ou, ce qui est souvent nécessaire, intercaler entre eux

un troisième métal C. De même pour étudier la force électromotrice dans un circuit formé de deux métaux A et B, on pourra, sans qu'il en résulte aucune modification de cette force électromotrice, couper le circuit et en réunir les deux extrémités à un appareil de mesure, pourvu que tous les conducteurs intercalés entre les deux extrémités du circuit soient à la même température que ces extrémités. On comprend dès lors l'importance de la loi des métaux intermédiaires.

652. **Couples et piles thermo-électriques.** — Un circuit formé de deux métaux différents porte le nom de *couple* ou d'*élément thermo-électrique*.

La force électromotrice de ces couples est toujours très faible et égale seulement à une très petite fraction de volt; l'une des plus considérables, celle du couple bismuth-antimoine, est de $0^{\text{me}},0057$ lorsque l'une des soudures est à 0° et l'autre à 100° . On peut remédier à cet inconvénient par l'emploi d'un grand nombre de couples associés en série qui constituent alors une *pile thermo-électrique*. Il faut remarquer toutefois que, les couples thermo-électriques étant entièrement métalliques, leur résistance est toujours très faible si on la compare à celle des couples hydro-électriques; aussi ne peut-on obtenir avec une pile thermo-électrique des courants assez intenses que si la résistance du circuit extérieur est elle-même très faible.

Quand on associe des couples thermo-électriques en série pour constituer une pile, on dispose les divers couples de telle sorte que toutes les soudures de rang pair, par exemple, puissent être chauffées simultanément et que toutes les soudures de rang impair puissent être maintenues facilement à une température plus basse.

Dans la *pile de Melloni*, que nous avons déjà décrite (§ 533), les couples associés sont constitués par des barreaux de bismuth et d'antimoine soudés et soudés bout à bout de façon que toutes les soudures paires soient d'un côté et toutes les soudures impaires de l'autre. La force électromotrice du couple bismuth-antimoine, qui constitue cette pile, est sensiblement proportionnelle à la différence de température $t_1 - t_2$ de ses soudures, tant que t_1 et t_2 sont compris entre 0° et 100° .

La *pile Noé* et la *pile Clamond* sont les seules qui soient utilisées aujourd'hui comme sources d'électricité. L'*élément Noé* est constitué par des fils de maillechort soudés à des barreaux formés d'un alliage de zinc et d'antimoine. Dans l'*élément Clamond*

mond, ce sont des barreaux de fer ou de nickel qui sont associés avec un alliage de zinc et d'antimoine. Les divers couples sont en général groupés circulairement, de telle sorte qu'un brûleur à gaz, placé au centre, chauffe simultanément toutes les soudures paires, par exemple, tandis que les soudures impaires, placées à la périphérie, se maintiennent d'elles-mêmes à une température voisine de la température ambiante.

Le modèle de la pile Clamond à 120 éléments petit modèle a, en marche normale, une force électromotrice de 8 volts et une résistance de 3.2 ohms.

653. **Emploi des couples thermo-électriques pour la mesure des températures.** — D'une façon générale, lorsque l'on maintient l'une des soudures d'un couple thermo-électrique à une température constante, la force électromotrice du couple dépend de la température de l'autre soudure. Si donc on détermine, pour un couple donné et pour une température donnée (0° par exemple) de la soudure froide, la relation qui lie la force électromotrice à la température de la soudure chaude, cette relation permettra de déduire la température d'un corps de la force électromotrice du couple, lorsque l'une des soudures du couple sera en contact avec ce corps et que l'autre sera maintenue à la température 0°. Il faut seulement que le couple choisi reste comparable à lui-même et ne subisse, dans son état moléculaire, aucune modification telle que trempe, écrouissage, recuit, capable de modifier sa force électromotrice.

La mesure d'une température se ramène ainsi à celle de la force électromotrice d'un couple dans les conditions sus-indiquées, ou, ce qui revient au même, à la mesure de l'intensité du courant fourni par le couple dans un circuit de résistance connue. Cette intensité peut se déterminer elle-même à l'aide d'un *galvanomètre*, instrument que nous décrirons plus loin et qui permet de déduire de la déviation d'une aiguille aimantée l'intensité du courant qui le traverse.

Pour le couple platine-palladium, la relation qui lie la force électromotrice E à la température t de la soudure chaude, la soudure froide étant à 0°, est donnée avec une approximation suffisante, tant que t ne dépasse pas 1500°, par la formule :

$$E = 4.3t + \frac{7.3}{1000} t^2.$$

Pour le couple platine—platine-rhodié et pour des valeurs de t comprises entre 300° et 1200° , la relation entre la force électromotrice et la température de la soudure chaude est :

$$E = -0.15 + 0.145t.$$

Le Châtelier a utilisé les couples thermo-électriques pour la mesure des températures très élevées et Wroblewski s'est servi, dans ses expériences sur la liquéfaction des gaz, d'un couple cuivre-maillehort pour la mesure de très basses températures.

Avec le couple bismuth-antimoine, on peut admettre qu'entre 0° et 100° la force électromotrice ou l'intensité du courant dans un circuit déterminé sont proportionnelles à la différence de température des soudures ; il suffit donc, entre ces limites, de connaître l'intensité du courant qui correspond, dans un circuit déterminé, à une différence de température de 1° des soudures, pour déduire, de l'intensité que présente le courant dans ce même circuit à un moment quelconque, la différence de température qui existe à ce moment entre les deux soudures et par suite la température de l'une de ces soudures si l'on connaît celle de l'autre.

La pile de Melloni, formée de plusieurs couples bismuth-antimoine, constitue un thermomètre différentiel excessivement sensible dont nous avons indiqué l'emploi dans l'étude de la chaleur rayonnante.

On peut avoir à employer la pile thermo-électrique pour la mesure des températures, non pas à cause de la sensibilité de cet instrument, mais parce que la forme que l'on peut donner aux couples permet d'atteindre, à l'intérieur des corps, en particulier chez les animaux, des points au contact desquels il serait au moins difficile de placer le réservoir d'un thermomètre ordinaire. Dans ces cas on peut adopter une disposition qui dispense de déterminer au préalable la relation qui existe entre la différence de température des soudures et l'intensité du courant observé. A cet effet, on place l'une des soudures d'un couple thermo-électrique au point dont on veut déterminer la température, tandis que l'autre soudure est plongée dans un bain dont la température, variable au gré de l'opérateur, est indiquée par un bon thermomètre à mercure ; un galvanomètre intercalé dans le circuit montre d'ailleurs, par la déviation de l'aiguille, s'il existe entre les deux soudures une différence de température et le sens de cette différence. Les choses ainsi disposées, on élève ou l'on abaisse la température du bain

jusqu'à ce que l'aiguille du galvanomètre ne subisse aucune déviation, ce qui indique que l'instrument n'est à ce moment traversé par aucun courant et que les deux soudures sont par suite à la même température. La température du bain, lue sur le thermomètre, fait alors connaître la température cherchée.

Au lieu d'employer, comme nous venons de l'indiquer, un seul couple thermo-électrique, on en prend généralement deux identiques, que l'on monte en *opposition* ⁽¹⁾ comme le montre la figure 394. Les métaux A et A' sont reliés aux bornes du galvanomètre, l'une des soudures B est plongée dans le bain à température variable, l'autre est placée au point dont on veut déterminer la température.

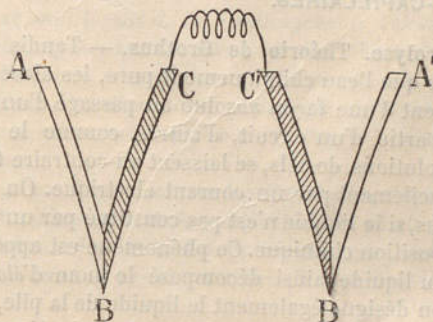


Fig. 394. — Aiguilles thermo-électriques associées en opposition.

En vertu de la loi des métaux intermédiaires, cette disposition revient à celle que nous venons de décrire.

La forme donnée aux couples thermo-électriques pour la mesure des températures dépend du but à atteindre. On fait fréquemment usage en Physiologie, pour évaluer la température à l'intérieur des tissus, d'*aiguilles thermo-électriques* constituées, comme celles de la figure 394, par deux métaux soudés en une pointe que l'on enfonce dans les tissus à explorer (Becquerel), ou par deux métaux concen-

⁽¹⁾ On dit que deux éléments de pile ou deux piles sont montés en *opposition* lorsque les deux pôles positifs ou les deux pôles négatifs communiquent. Un raisonnement analogue à celui du paragraphe 640 montrerait que la différence de potentiel sur les deux pôles libres est égale à la différence $E-e$ des forces électromotrices des deux éléments ou des deux piles ainsi associées.

triques étirés à la filière jusqu'à ce qu'ils soient assez fins pour pénétrer facilement dans ces tissus (d'Arsonval). Pour la mesure des températures locales périphériques, on se sert en Clinique de couples thermo-électriques dont les soudures, constituées par des surfaces planes, peuvent s'appliquer sur les divers points du corps.

CHAPITRE VII

ACTIONS CHIMIQUES PRODUITES PAR LES COURANTS ET ACTIONS CHIMIQUES DANS LES PILES. PHÉNOMÈNES ÉLECTRO-CAPILLAIRES.

654. **Electrolyse. Théorie de Grothus.** — Tandis que certains liquides, tels que l'eau chimiquement pure, les alcools, les éthers, etc., s'opposent d'une façon absolue au passage d'un courant lorsqu'ils font partie d'un circuit, d'autres, comme le mercure, les acides, les solutions de sels, se laissent au contraire traverser plus ou moins facilement par un courant électrique. On observe dans ce dernier cas, si le liquide n'est pas constitué par un corps simple, une décomposition chimique. Ce phénomène est appelé *électrolyse*; on donne au liquide ainsi décomposé le nom d'*électrolyte*, nom par lequel on désigne également le liquide de la pile, parce que ce liquide est soumis aux mêmes phénomènes de décomposition. On appelle encore *électrodes* les extrémités par lesquelles les conducteurs partant des pôles positif et négatif de l'électromoteur plongent dans l'électrolyte. Ces électrodes sont généralement constituées par des lames ou des fils de platine ou de cuivre, par du mercure, du charbon, etc.

On donne le nom d'*anode* ⁽¹⁾ à l'électrode par laquelle *entre* le courant, de *kathode* ⁽²⁾ à celle par laquelle le courant *sort*. Dans le circuit extérieur, l'anode est donc positive et la cathode négative, mais c'est l'inverse à l'intérieur de la pile.

Les seuls corps susceptibles d'être décomposés par l'électrolyse paraissent être les sels et les acides à l'état liquide. Les acides peuvent du reste rentrer dans la catégorie des sels puisqu'on peut les considérer comme des sels d'hydrogénium.

Les corps résultant de la décomposition d'un électrolyte n'appar-

(1) Ἀνοδος, chemin d'entrée.

(2) Καθοδος, chemin de retour.

raissent que sur les électrodes mêmes ; ce fait a été expliqué par Grothus en admettant que les molécules de l'électrolyte sont toutes orientées, par le passage du courant, de la même manière en files linéaires d'une électrode à l'autre. Les décompositions s'opèreraient ainsi de molécule à molécule, séparant le métal du radical auquel il est combiné, et s'accompagneraient de recompositions entre les éléments séparés des molécules consécutives ; il n'y aurait ainsi que la première et la dernière molécule de chaque série dont la décomposition laisserait libres des parties dissemblables.

L'observation montre que, *dans la décomposition d'un électrolyte, la séparation se fait toujours entre le métal et le radical simple ou composé qui lui est uni ; le métal, ou l'hydrogène si l'électrolyte est un acide, apparaît toujours sur la cathode, le radical sur l'anode.*

Faraday a donné le nom de *ions* aux éléments mis en liberté par la décomposition d'un électrolyte ; l'ion qui se porte sur l'anode est alors appelé *anion*, celui qui se porte sur la cathode, a reçu le nom de *cathion*.

Les ions peuvent réagir, soit sur les électrodes, soit sur le solvant de l'électrolyte, si bien que la décomposition de l'électrolyte paraît, si l'on en considère les termes définitifs, ne plus obéir à la règle précédente ; on donne à ces phénomènes le nom d'*actions chimiques secondaires*.

655. **Exemples d'électrolyse.** — Les appareils employés pour l'électrolyse ont des formes qui varient un peu suivant la nature des produits que l'on veut recueillir et suivant le but que l'on se propose d'atteindre par l'électrolyse.

On peut placer l'électrolyte dans un vase à l'intérieur duquel plongent les deux électrodes.

Lorsqu'on veut séparer les produits de décomposition, on fait fréquemment usage, pour contenir l'électrolyte, d'un tube en U dans les deux branches duquel on enfonce les électrodes.

Dans le cas où l'un des produits de la décomposition est gazeux, on se sert d'un appareil qui est constitué par un vase en verre traversé à sa partie inférieure par deux électrodes. On place l'électrolyte dans le vase et l'on recouvre chaque électrode d'une éprouvette graduée remplie du même électrolyte. Cet appareil, dont une des formes les plus usuelles est représentée sur la figure 395, porte le nom de *voltamètre*.

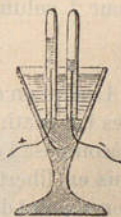


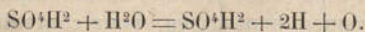
Fig. 395.
Voltamètre.

Si l'on place dans un voltamètre une solution de HCl et que l'on fasse passer le courant, on observe, conformément à la règle énoncée au précédent paragraphe, un dégagement de Cl sur l'anode et un dégagement de H sur la cathode. Les volumes de H et de Cl qui se rassemblent au sommet des deux éprouvettes sont du reste égaux, si l'on a eu soin de saturer la solution de chlore afin d'éviter la dissolution dans l'eau des premières parties de Cl provenant de la décomposition de HCl.

C'est en électrolysant un fragment de potasse humide (KOH) que Davy a obtenu pour la première fois le potassium.

On a obtenu par le même procédé le sodium et le lithium (Davy), le calcium, le magnésium, l'aluminium (Bunsen et Mathiessen). L'électrolyse du fluorure double d'aluminium et de sodium est même aujourd'hui un procédé industriel de préparation de l'aluminium (procédé Minet).

En électrolysant, dans un voltamètre à électrodes de platine, une solution de SO^{H}_2 , on recueille de l'oxygène dans l'éprouvette qui recouvre l'anode et un volume double d'hydrogène dans l'éprouvette qui recouvre la cathode ; le résultat est donc le même que si le courant avait décomposé l'eau H^{O} en ses éléments et l'on donne quelquefois improprement à cette électrolyse le nom d'électrolyse de l'eau. L'eau pure semble jusqu'à ce jour ne pouvoir être décomposée par un courant ; en réalité, dans l'expérience que nous venons de rapporter, l'électrolyte est l'acide sulfurique qui, sous l'action du courant, se décompose en H^2 qui se dégage sur la cathode, tandis que SO^{H} , qui se montre sur l'anode, réagit sur l'eau de la solution pour reformer SO^{H}_2 ; de là dégagement de 1 volume d'oxygène pour 2 volumes d'hydrogène mis en liberté sur la cathode :



Lorsqu'on électrolyse une solution de $\text{SO}^{\text{H}}\text{K}^2$ au moyen d'électrodes en platine, le potassium K^2 , mis en liberté à la cathode, y décompose l'eau, il se forme 2KOH et H^2 se dégage ; à l'anode, SO^{H} mis en liberté donne, en présence de l'eau, $\text{SO}^{\text{H}}_2 + \text{O}$; il y a par conséquent dégagement d'oxygène. Par suite des actions secondaires entre les ions et le solvant, les choses se passent donc comme si le courant avait décomposé simultanément H^{O} en $\text{H}^2 + \text{O}$ et $\text{SO}^{\text{H}}\text{K}^2$ en K^{O} et en SO^{H} qui se seraient combinés l'un et l'autre à l'eau de la solution.

Des phénomènes analogues se produisent lors de l'électrolyse

des divers sels alcalins et des sels ammoniacaux, le radical AzH^4 de ces derniers se comportant comme un métal alcalin.

Les actions secondaires consécutives à l'électrolyse des sels alcalins intéressent directement le médecin, car elles sont la base d'un emploi thérapeutique des courants qui est désigné sous le nom de *galvano-caustique chimique*.

Si l'on électrolyse une solution de SO^4Cu avec deux électrodes en cuivre, le Cu se dépose sur la cathode tandis que SO^4 , mis en liberté à l'anode, attaque le métal qui constitue cette électrode et reforme autant de SO^4Cu que le courant en a décomposé. Grâce à cette action secondaire de l'un des ions sur l'électrode, la richesse de la solution reste constante et l'on peut dire que l'effet du courant se réduit à un transport de Cu de l'anode sur la cathode.

La galvanoplastie, la dorure, l'argenture et le nikelage galvaniques sont, comme nous allons le voir, autant d'applications industrielles de l'électrolyse.

656. Applications de l'électrolyse. Galvanoplastie. Dorure. Argenture. Blanchiment. Désinfection, etc. — L'électrolyse de certaines solutions métalliques permet, comme on l'a vu dans le paragraphe précédent, de déposer une couche de métal sur l'une des électrodes ; on peut dès lors utiliser ce phénomène, soit pour reproduire tous les détails d'un moule avec lequel on constitue l'électrode, soit pour recouvrir un objet d'une couche de tel ou tel métal. La première opération constitue la *galvanoplastie* qui, imaginée presque simultanément par Jacobi en Russie et Spencer en Angleterre, est devenue aujourd'hui une importante branche de l'industrie ; la seconde constitue la *dorure*, l'*argenture*, etc., suivant la nature du dépôt électrolytique.

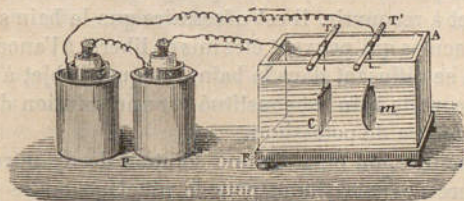


Fig. 396. — Galvanoplastie.

Pour reproduire un objet par galvanoplastie, il faut d'abord préparer un moule de cet objet ; ce moule se fait généralement en

plâtre, en cire ou en gutta-percha et la face dont on veut reproduire les détails est rendue conductrice par une mince couche de plombagine finement pulvérisée. On entoure les bords du moule (*m*, fig. 396), d'un fil de cuivre, on le plonge, ainsi préparé, dans un vase H contenant une solution saturée de sulfate de cuivre, on dispose en face, à une certaine distance, une lame de cuivre C, puis on relie le moule au pôle négatif d'une pile et la lame de cuivre au pôle positif. Le courant décompose le sulfate de cuivre et tout se passe, ainsi que nous l'avons vu (§ 653), comme s'il y avait transport de cuivre, molécule à molécule, de la lame C sur le moule *m*, la concentration de la solution ne variant pas. Lorsque la couche de cuivre déposée sur le moule a une épaisseur suffisante, on la détache du moule, auquel elle n'adhère que faiblement à cause de la couche de plombagine interposée.

La plaque de cuivre ainsi obtenue reproduit d'autant plus fidèlement tous les détails du moule que le dépôt s'est opéré plus lentement.

L'une des applications les plus importantes de la galvanoplastie consiste dans la reproduction en cuivre des gravures sur bois destinées à l'impression. Le cliché ainsi obtenu, beaucoup plus résistant que le bois, permet de tirer un beaucoup plus grand nombre d'épreuves; on peut, en outre, avec une seule gravure sur bois, obtenir par galvanoplastie autant de clichés que l'on désire.

Si l'on veut recouvrir un objet métallique d'un dépôt électrolytique, il faut d'abord le décaper, le laver et le dégraisser avec soin, afin que le dépôt puisse bien adhérer (§ 89); on relie ensuite l'objet au pôle négatif d'une pile et on le plonge dans une solution d'un sel du métal dont on veut le recouvrir. Une lame du même métal, reliée au pôle positif de la pile, est plongée dans ce même bain, en face de l'objet à recouvrir. Il est nécessaire que le bain soit alcalin afin que les acides qui peuvent être mis en liberté à l'anode ne viennent pas, en se diffusant dans le bain, attaquer l'objet à recouvrir.

Pour la dorure, le bain est constitué par une solution de chlorure d'or et de chlorure de potassium.

Pour l'argenture, on emploie une solution de cyanure d'argent et de cyanure de potassium; pour le nikelage on se sert d'une solution de sulfate double de nickel et d'ammoniaque, etc.

On peut encore obtenir galvaniquement le dépôt d'un alliage sur un métal; c'est ainsi qu'il est possible de recouvrir le fer et le zinc d'une couche de laiton.

Tous les métaux ne sont du reste pas susceptibles de former, les uns sur les autres, des dépôts électrolytiques adhérents. On ne peut, par exemple, déposer directement l'or ou l'argent sur le fer; il faut, si l'on veut dorer ou argenter des objets en fer, commencer par les recouvrir d'une couche de cuivre.

Les électromoteurs généralement employés pour obtenir les dépôts galvaniques sont les piles hydro-électriques, ou les machines d'induction à courants redressés ou constants.

Parmi les nombreuses applications de l'électrolyse nous citerons encore le blanchiment électrique qui s'obtient en plaçant la substance à blanchir dans une solution aqueuse de chlorure de magnésium, au sein de laquelle plongent des électrodes inattaquables; citons également le système Hermitte d'assainissement, qui consiste dans la désinfection des eaux ménagères et des eaux d'égouts par de l'eau de mer électrolysée.

657. **Lois quantitatives de l'électrolyse ou lois de Faraday.** — Nous n'avons fait jusqu'à présent l'étude de l'électrolyse qu'au point de vue qualitatif. Les lois quantitatives de ce phénomène ont été établies par Faraday et leur vérification expérimentale est des plus simples; ces lois s'énoncent de la manière suivante :

1^o *La quantité d'un électrolyte décomposée par un même courant dans un même temps est indépendante de la position de l'électrolyte dans le circuit.*

2^o *La quantité d'un électrolyte décomposée par un courant est proportionnelle à la quantité d'électricité qui a traversé cet électrolyte, c'est-à-dire à l'intensité du courant supposé constant et à la durée de l'expérience.*

3^o *Lorsque plusieurs électrolytes sont simultanément décomposés par un même courant, les quantités des divers métaux déposées pendant le même temps sont proportionnelles aux équivalents chimiques de ces métaux.*

Soit, comme exemple de cette dernière loi, un voltamètre à eau acidulée et un voltamètre contenant une solution de sulfate de cuivre, disposés dans un circuit traversé par un courant; lorsque le courant a circulé pendant un certain temps, on trouve que les poids d'hydrogène dégagé dans l'un des voltamètres et de cuivre déposé dans l'autre sont dans le rapport des équivalents 1 et 31,5 de l'hydrogène et du cuivre (1).

(1) En réalité, cela n'est exact que si le second voltamètre ren-

658. **Polarisation des électrodes.** — Lorsqu'on décompose un électrolyte, le dépôt des *ions* sur les deux électrodes primitivement identiques modifie en général différemment la nature de ces électrodes, si bien que l'on a bientôt deux métaux différents plongeant dans l'électrolyte, c'est-à-dire un véritable élément de pile dont la force électromotrice vient s'ajouter algébriquement à celle du courant qui produit l'électrolyse.

C'est ce qu'il est facile de vérifier en plongeant deux lames de platine par exemple dans une solution de sulfate de zinc. Ces deux lames ne présentent évidemment dans ces conditions aucune différence de potentiel, comme on peut d'ailleurs s'en assurer avec l'électromètre ; mais si, à l'aide de ces deux lames comme électrodes, on fait passer un courant à travers la solution de SO_4Zn , le zinc se dépose sur la cathode, qu'il recouvre d'une couche d'épaisseur croissante, et SO_4 , mis en liberté à l'anode, réagit sur l'eau de la solution pour former SO_4H^2 , qui reste en solution dans l'électrolyte, et pour mettre en liberté O que l'anode absorbe jusqu'à saturation (§ 204). On a donc finalement une lame de platine oxygéné et une lame de zinc plongeant dans une solution d'acide sulfurique, ce qui constitue un élément de pile ; si, en effet, on interrompt le courant qui a provoqué l'électrolyse, on peut constater, avec l'électromètre, qu'il existe une différence de potentiel sur les deux électrodes ainsi modifiées. On dit que ces électrodes sont *polarisées*, et l'on donne le nom de *force électromotrice de polarisation* à la force électromotrice de l'élément créé par la décomposition de l'électrolyte.

Des phénomènes analogues aux précédents s'observent d'ailleurs chaque fois que l'on fait passer un courant à travers un électrolyte quelconque, à moins que cet électrolyte ne soit constitué par un sel du métal qui forme les électrodes. Dans le cas, par exemple, de l'électrolyse de l'eau acidulée avec des électrodes de platine, l'une des électrodes absorbe l'oxygène, l'autre l'hydrogène et c'est cette

ferme un corps constitué par un équivalent de métal M et par un équivalent de radical A. Si le composé est de la forme $\text{A}^n \text{M}^p$, la quantité d'électricité qui met en liberté un équivalent d'hydrogène dans un voltamètre à eau acidulée ne met en liberté qu'un équivalent du radical dans une solution du corps $\text{A}^n \text{M}^p$ et par suite $\frac{p}{n}$ équivalent du métal ; c'est donc la proportion du radical dans l'électrolyte qui règle la proportion de cet électrolyte qui est décomposée.

dernière qui constitue le pôle négatif de l'élément ainsi formé.

Il importe de remarquer que l'élément qui prend naissance par suite de la polarisation des électrodes donne un courant de sens inverse au sens du courant qui a produit la polarisation. Le platine oxygéné qui constitue, dans le premier exemple, le pôle positif du courant de polarisation, c'est-à-dire le pôle par lequel le courant sort de l'élément, est en effet l'anode ou l'électrode par laquelle le courant de la pile entrait dans l'électrolyte.

Il est évident d'ailleurs que la force électromotrice de polarisation, dont nous venons de démontrer l'existence lorsque le courant primitif cesse d'agir, doit se manifester aussi pendant le passage même de ce courant.

Il résulte évidemment de là que, pour électrolyser un composé, il faut employer une force électromotrice supérieure à sa force électromotrice de polarisation. Dans le cas d'un voltamètre à eau acidulée, la force électromotrice de polarisation est de $1^{\text{volt}}.49$; on ne pourra donc décomposer SO^{H^2} qu'avec un courant de force électromotrice supérieure à $1^{\text{volt}}.49$.

Les éléments obtenus par la polarisation des électrodes peuvent être à leur tour utilisés pour la production de courants; on leur donne alors le nom de *piles secondaires* ou d'*accumulateurs*.

659. **Actions chimiques à l'intérieur des piles.** — Des actions chimiques, complètement analogues à celles que nous venons d'étudier dans le circuit extérieur d'une pile hydro-électrique, se produisent également à l'intérieur des piles dont le circuit extérieur est fermé. La décomposition du liquide de la pile obéit, en effet, aux lois qualitatives et quantitatives que nous avons énoncées à propos de l'électrolyse; le métal se dépose toujours sur l'électrode par laquelle le courant sort de la pile, et par suite ici sur l'électrode positive, le radical sur l'électrode par laquelle le courant rentre dans la pile, c'est-à-dire sur l'électrode négative.

Lorsque le circuit de la pile comprend un électrolyte, pour chaque équivalent de métal mis en liberté dans l'électrolyte, il y a également un équivalent de métal mis en liberté dans la pile.

Le dépôt des ions sur les électrodes donne encore naissance, dans la pile même et par le mécanisme que nous avons déjà exposé, à une force électromotrice, qui agit en sens inverse de celle de la pile et affaiblit par conséquent l'intensité du courant que celle-ci peut fournir; on dit alors que la pile est *polarisée*.

Les actions chimiques qui se produisent dans le liquide de la

pile peuvent donc être regardées comme la conséquence directe du passage du courant à travers ce liquide ; mais on peut dire inversement que la production du courant a son origine dans ces actions chimiques. Il importe peu d'ailleurs, au point de vue pratique, de savoir laquelle de ces deux opinions est la vraie, et il suffit de savoir que les deux phénomènes, production d'un courant et actions chimiques, sont concomitants et que c'est toujours l'électrode attaquée, ou la plus attaquée si elles le sont toutes deux, qui constitue l'électrode négative de l'élément.

Il importe de remarquer encore que toute réaction chimique concomitante de la production d'un courant est exothermique, c'est-à-dire accompagnée d'un dégagement de chaleur ; c'est la quantité de chaleur dégagée par cette réaction qui mesure l'énergie rendue disponible dans un couple, à moins qu'il ne se produise, dans le couple même, des actions

secondaires qui, en absorbant une partie de la chaleur dégagée par l'action chimique principale, diminuent d'autant la quantité d'énergie mise en liberté. Dans tous les cas, c'est l'énergie rendue ainsi réellement disponible qui fournit le travail nécessaire à la production du courant, mais la totalité de cette énergie n'est pas toujours transformée en énergie électrique.

660. Piles du genre Volta. Cause de leur affaiblissement. — La pile de Volta (fig. 397) était constituée par une série de disques, formés d'une lame de cuivre soudée à une lame de zinc, que l'on empilait les uns sur les autres en séparant le cuivre d'un disque du zinc du disque suivant au moyen d'une rondelle de drap imbibée d'eau acidulée par SO^4H^2 . La superposition de tous ces disques avait pour inconvénient de comprimer les rondelles de drap et d'en

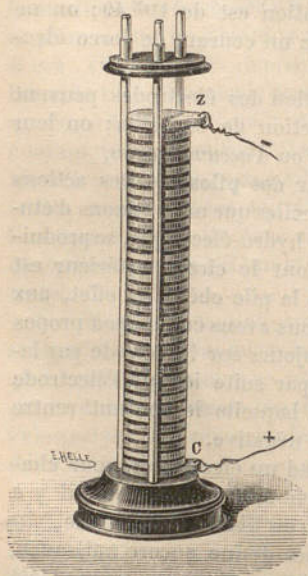


Fig. 397. — Pile de Volta.

faire écouler le liquide, qui établissait ainsi une communication entre les divers éléments. Aussi substitua-t-on bientôt à la pile à colonne

la *pile à auge*, puis la *pile à tasses*, etc. Tous ces modèles ne diffèrent que par leur forme; leurs éléments sont tous constitués par deux électrodes zinc-cuivre plongeant dans une solution de SO^+H^2 et la réaction chimique, qui s'y produit, consiste, d'une part, dans l'attaque de l'électrode négative zinc par le radical SO^+ , avec formation de SO^+Zn , d'autre part, dans le dégagement d'hydrogène sur l'électrode positive cuivre.

Les courants fournis par ces éléments diminuent rapidement d'intensité; les causes de cet affaiblissement sont nombreuses :

1° le dépôt d'hydrogène sur l'électrode positive donne naissance à une force électromotrice de polarisation qui se retranche de celle de l'élément;

2° la présence d'une couche d'hydrogène sur l'électrode positive augmente en outre la résistance intérieure de la pile et diminue par suite la force électromotrice disponible;

3° La richesse du liquide en SO^+H^2 diminue peu à peu, par suite même de la décomposition de SO^+H^2 ;

4° le sulfate de zinc formé par l'action du radical SO^+ sur l'électrode négative est électrolysé par le courant qui traverse la pile, et le zinc se dépose alors sur le cuivre de l'électrode positive, qu'il recouvre peu à peu.

661. **Conditions que doit remplir une pile. Dépolarisation. Zinc amalgamé.** — Si l'on veut qu'une pile fournisse un courant constant, il faudra donc éviter tout d'abord la polarisation des électrodes. On y parvient en général d'une façon assez satisfaisante en choisissant convenablement les substances dont les réactions doivent fournir l'énergie nécessaire à la production du courant et en provoquant dans la pile, comme nous le dirons plus loin lors de la description des divers éléments, des actions secondaires qui empêchent la mise en liberté d'hydrogène, ou d'autres substances capables de produire le même effet. On a qualifié de *dépolarisants* les corps, solides ou liquides, qui permettent d'obtenir ce résultat.

Il faut en outre maintenir constante la concentration du ou des liquides qui constituent la pile. On peut y parvenir, soit en renouvelant automatiquement ces liquides à mesure qu'ils s'usent, soit, plus généralement, en y ajoutant quelques cristaux des substances qu'ils tiennent en solution.

Il faut enfin évidemment éviter autant que possible l'usure inutile des électrodes, et, par suite, il faut que la pile ne fonctionne que lorsque le circuit est fermé. Or l'électrode négative des divers

modèles de piles est généralement en zinc. D'autre part, si l'on plonge dans de l'eau acidulée une lame de zinc chimiquement pur et une lame de platine, de façon que ces deux électrodes ne se touchent pas, il ne se produit aucune action chimique appréciable tant que les deux lames ne sont pas réunies extérieurement par un conducteur; par contre, si l'on répète l'expérience précédente avec du zinc ordinaire, celui-ci est attaqué par l'eau acidulée, même en circuit ouvert, et l'on constate alors que des bulles d'hydrogène se dégagent sur le zinc et qu'il se forme du sulfate de zinc. Ces effets sont d'ailleurs dus à la présence dans le zinc ordinaire d'impuretés, qui forment avec le zinc et le liquide de petits couples locaux dont le circuit est constamment fermé et qui fonctionnent aussi bien quand le circuit général est ouvert que lorsqu'il est fermé. Le zinc s'use donc de ce fait sans donner naissance à un courant utilisable et l'on devrait, par suite, si l'on veut éviter cette usure inutile, se servir de zinc chimiquement pur. Toutefois le zinc pur est d'un prix trop élevé pour qu'on puisse songer à l'employer dans les piles; mais de la Rive a montré que le zinc ordinaire jouissait, lorsqu'il était amalgamé, de la propriété de n'être attaqué, comme le zinc pur, qu'en circuit fermé. Aussi est-ce du zinc amalgamé que l'on fait toujours usage dans la construction des piles.

662. Piles à courants constants. **Éléments divers.** — Nous décrivons sommairement les éléments les plus employés, en particulier dans les applications médicales et physiologiques.

Élément Daniell. — C'est, de tous les éléments, celui qui donne le courant le plus constant. Il se compose (fig. 398) d'une lame de zinc plongeant dans de l'eau acidulée par l'acide sulfurique et d'une lame de cuivre plongeant dans une solution saturée de sulfate de cuivre. Les deux solutions, séparées par un vase poreux qui renferme la solution de sulfate de cuivre et la lame de cuivre, communiquent donc sans pouvoir se mélanger rapidement; la lame de zinc constitue l'électrode négative, la lame de cuivre l'électrode positive. La succession des diverses parties constituantes de cet élément peut être représentée de la façon suivante :

Zinc amalgamé.	Eau acidulée par SO^+H^2 .	Cloison poreuse.	Solution de SO^+Cu .	Cuivre.
-------------------	---	---------------------	---	---------

En circuit fermé, il ne se produit, dans cet élément, aucune action chimique; en circuit ouvert, SO^+ mis en liberté sur le

zinc attaque ce métal pour former $\text{SO}^{\text{z}}\text{Zn}$, tandis que l'hydrogène de la dernière molécule de $\text{SO}^{\text{z}}\text{H}^{\text{z}}$, qui se trouve au niveau de la cloison poreuse, réagit sur la molécule voisine de sulfate de cuivre pour former $\text{SO}^{\text{z}}\text{H}^{\text{z}}$ avec mise en liberté de Cu ; celui-ci réagit sur la molécule suivante, conformément à la théorie de Grothus, si bien qu'il y a, en définitive, dépôt de Cu sur l'électrode en cuivre. Ce dépôt ne modifiant nullement cette électrode, il ne peut y avoir polarisation; le sulfate de cuivre, en empêchant le dégagement d'hydrogène, a donc joué le rôle de dépolarisant.

On voit que la proportion d'acide sulfurique reste constante, puisque, pour chaque molécule détruite, il y a une nouvelle molécule formée, tandis que la concentration de la solution de sulfate de cuivre va constamment en diminuant; on conserve d'ailleurs facilement cette solution à l'état de saturation en maintenant à sa partie supérieure quelques cristaux de sulfate de cuivre. Tandis que la lame de cuivre augmente d'épaisseur, la lame de zinc s'use et il se forme du sulfate de zinc, qui sature peu à peu l'eau acidulée et finit même par cristalliser dans le vase qui la renferme; la présence et l'électrolyse de ce sulfate ne gênent du reste en rien le fonctionnement de la pile. On substitue même souvent la solution de sulfate de zinc à l'eau acidulée dans la pile Daniell; l'action chimique est alors sensiblement la même; SO^{z} se porte sur le zinc pour reformer $\text{SO}^{\text{z}}\text{Zn}$, tandis qu'au niveau de la cloison poreuse Zn donne, avec $\text{SO}^{\text{z}}\text{Cu}$, $\text{SO}^{\text{z}}\text{Zn}$ plus du cuivre, qui réagit sur la molécule suivante et ainsi de suite jusqu'à la dernière molécule de $\text{SO}^{\text{z}}\text{Cu}$ dont le Cu se dépose encore sur l'électrode positive. Pour chaque molécule de sulfate de zinc détruite, il y a donc formation de deux molécules du même composé et par suite encore accumulation de ce composé dans le liquide.

La force électromotrice de l'élément Daniell, soit que le zinc plonge dans l'eau acidulée, soit que ce métal plonge dans une solution de sulfate de zinc, est de $1^{\text{volt}}.08$. Toutes choses égales

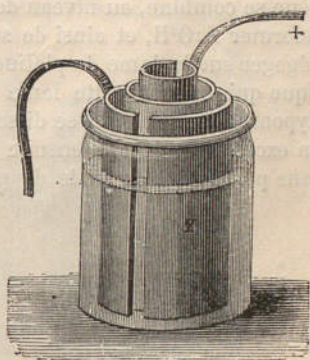


Fig. 398. — Élément Daniell.

d'ailleurs, la résistance intérieure de l'élément est moindre avec l'eau acidulée qu'avec le sulfate de zinc.

On donne à l'élément Daniell bien des formes différentes que nous ne décrivons pas; l'une des plus usuelles est celle qui est représentée sur la figure 398.

Éléments de Grove et de Bunsen. — L'élément de Grove se compose de :

Zinc amalgamé.	Eau acidulée par SO^4H^2 .	Cloison poreuse.	Solution de Platine. AzO^3H .
----------------	--	------------------	---

Tandis que SO^4 attaque le zinc pour former SO^4Zn , l'hydrogène se combine, au niveau de la cloison poreuse, avec AzO^3 pour reformer AzO^3H , et ainsi de suite; l'hydrogène qui tendrait à se dégager sur la lame de platine réagit d'autre part sur l'acide azotique qui entoure cette lame pour former de l'eau et de l'acide hypoazotique. Celui-ci se dissout d'ailleurs dans l'acide azotique en excès et se dégage ensuite peu à peu par la surface du liquide sans polariser l'électrode de platine. Toutefois, l'action dépolarisante de l'acide azotique va en s'atténuant à mesure que la proportion de cet acide dans la solution diminue; aussi l'élément de Grove fournit-il un courant moins constant que celui de Daniell.

Bunsen a rendu l'élément de Grove d'un emploi plus courant en substituant un cylindre de charbon à la lame de platine qui constitue l'électrode positive de cet élément. La force électromotrice d'un élément Bunsen est de 1 volt.8.

Élément de Poggendorff ou élément au bichromate de potassium. — Cet élément est constitué par une électrode négative en zinc, de l'eau acidulée par SO^4H^2 , une solution de bichromate de potassium et une électrode positive en charbon. On supprime généralement le vase poreux et l'on mé-

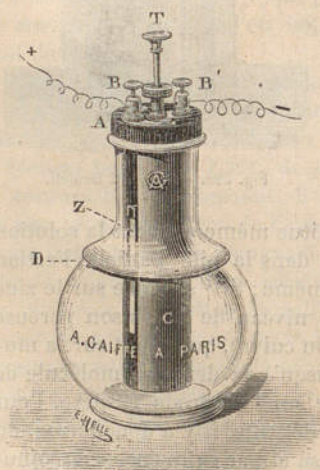


Fig. 399. — Élément Grenet.

l'élément de Grove d'un emploi plus courant en substituant un cylindre de charbon à la lame de platine qui constitue l'électrode positive de cet élément. La force électromotrice d'un élément Bunsen est de 1 volt.8.

Élément de Poggendorff ou élément au bichromate de potassium.

— Cet élément est constitué par une électrode négative en zinc, de l'eau acidulée par SO^4H^2 , une

solution de bichromate de potassium et une électrode positive en charbon. On supprime généralement le vase poreux et l'on mé-

lance le corps dépolarisant (bichromate de potassium) à l'eau acidulée; l'hydrogène mis en liberté réduit le bichromate et il se forme de l'alun de chrome, mais la dépolarisation n'est pas complète.

La suppression du vase poreux et la possibilité de placer les deux électrodes très près l'une de l'autre font que cet élément a une résistance intérieure très faible; aussi est-il fréquemment employé pour la galvanocaustique thermique. Sa force électromotrice est de 1 volt.8; on lui donne fréquemment la forme représentée sur la figure 399; il est alors connu sous le nom de *pile à bouteille* ou de *pile Grenet*. La lame de zinc Z placée entre deux lames de charbon C peut être maintenue hors du liquide, lorsque la pile ne fonctionne pas, grâce à une tige T qui glisse à travers une ouverture pratiquée dans le couvercle A et qui peut être fixée par une vis de pression.

Élément Leclanché. — Une tige de zinc Z (fig. 400) et un cylindre C, constitué par du charbon et du bioxyde de manganèse agglomérés entre eux, plongent dans une solution de chlorhydrate d'ammoniaque. Le corps dépolarisant, MnO^2 , est solide; les réactions intérieures à cet élément sont imparfaitement connues. Cet élément ne s'use qu'en circuit fermé, mais il se polarise quand on lui demande un long débit; il est, au contraire, très avantageux pour un service intermittent, car il peut alors fonctionner plusieurs années sans qu'on ait à renouveler aucune de

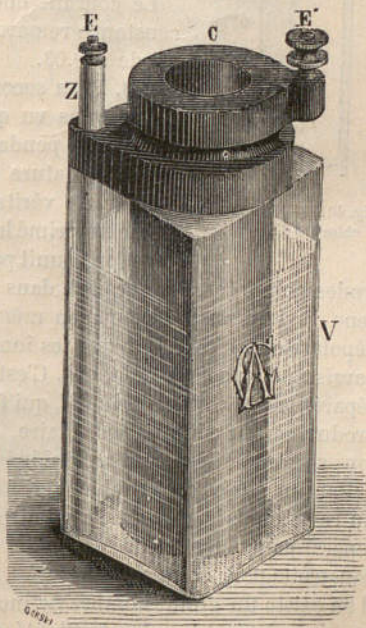


Fig. 400. — Élément Leclanché.

ses parties. L'élément Leclanché est très employé pour les sonneries électriques, sa force électromotrice est de 1 volt.48.

Élément au chlorure d'argent. — Il est constitué par une lame

de zinc Z (fig. 401) et par un fil d'argent recouvert de chlorure d'argent Y, corps dépolarisant solide; la lame et le fil plongent dans une solution de chlorure de sodium ou sont simplement en contact avec des feuilles de papier buvard interposées en l et imbibées de chlorure de sodium.

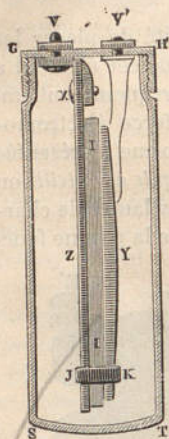


Fig. 401. — Élément au chlorure d'argent.

Le zinc déplace le sodium de son chlorure, et le sodium déplace à son tour l'argent pour reformer du chlorure de sodium. Comme il n'y a pas de gaz mis en liberté, on peut fermer hermétiquement la pile, ce qui la rend transportable.

Le courant obtenu avec cet élément a une constance remarquable; la force électromotrice est de 1^{volt}.03.

663. Piles secondaires ou accumulateurs. —

Nous avons vu que le dépôt des ions sur les électrodes pendant l'électrolyse modifie en général la nature de ces électrodes de façon à former un véritable élément de pile. Si, après avoir supprimé le courant qui produit l'électrolyse, on réunit par un conducteur les deux électrodes polarisées, il se produit dans ce conducteur un courant de sens inverse au précédent, en même temps que les électrodes se dépolarisent, c'est-à-dire que les ions dont elles sont couvertes disparaissent en se recombinaison. C'est la recombinaison de ces ions, séparés par le courant primitif, qui fournit l'énergie nécessaire à la production du courant secondaire, et ce courant cesse dès que les ions se sont entièrement recombinaison.

Par un choix convenable d'électrodes et d'électrolyte, on peut du reste obtenir, comme l'a montré Planté, des courants assez intenses pour être utilisés dans la pratique. Les éléments ainsi construits portent le nom de *piles secondaires* ou d'*accumulateurs*; il en existe un grand nombre de modèles, mais la plupart diffèrent peu en principe de celui de Planté que nous décrirons seul.

Dans l'accumulateur de Planté, les électrodes sont constituées par des lames de plomb et l'électrolyte par de l'eau acidulée au moyen de SO^{H^2} . Pendant l'électrolyse, l'électrode négative se recouvre d'hydrogène, tandis qu'il se forme du sulfate de plomb sur l'électrode positive. Lorsqu'on réunit ensuite les deux élec-

trodes, l'hydrogène réduit le sulfate formé et reforme SO_4H^2 ; l'électrode négative de tout à l'heure constitue alors le pôle positif de l'accumulateur et réciproquement.

On conçoit, d'ailleurs, que les effets obtenus soient plus intenses

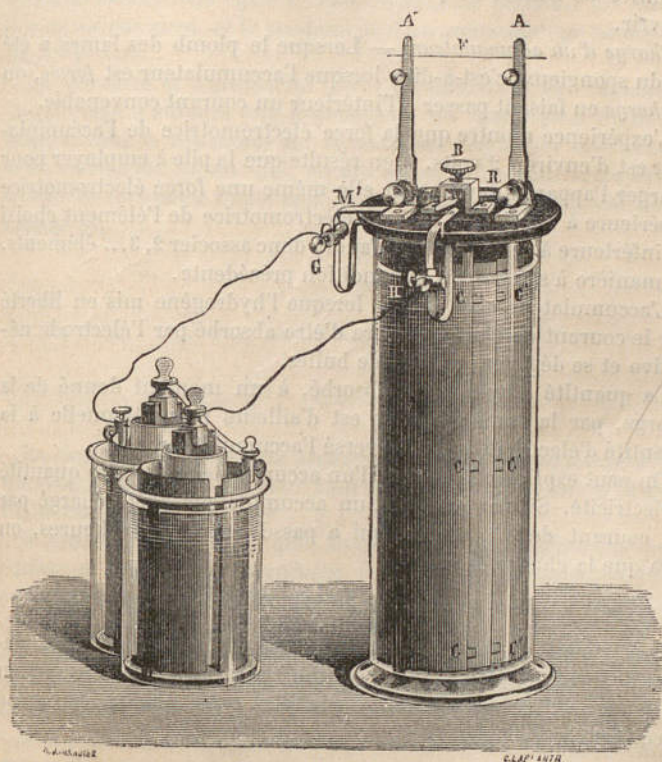


Fig. 402. — Charge d'un accumulateur.

et durent plus longtemps si la surface des électrodes est plus large et si la quantité d'hydrogène accumulée sur l'électrode négative est plus considérable. Pour augmenter la surface des électrodes, on les constitue par deux lames de plomb C, C' (fig. 402), que l'on enroule l'une sur l'autre en les maintenant à une petite distance au moyen de corps isolants de faible épaisseur. D'autre part, l'ex-

périence montre que, si l'on fait passer le courant, destiné à dégager l'hydrogène, alternativement dans un sens puis dans l'autre, on rend le plomb des plaques spongieux et l'on augmente ainsi la quantité d'hydrogène que l'électrode négative peut absorber et la quantité de sulfate de plomb dont l'autre électrode peut se recouvrir.

Charge d'un accumulateur. — Lorsque le plomb des lames a été rendu spongieux, c'est-à-dire lorsque l'accumulateur est formé, on le charge en faisant passer à l'intérieur un courant convenable.

L'expérience montre que la force électromotrice de l'accumulateur est d'environ 2 volts. Il en résulte que la pile à employer pour charger l'appareil devra avoir elle-même une force électromotrice supérieure à 2 volts. Si la force électromotrice de l'élément choisi est inférieure à cette valeur, il faudra donc associer 2, 3... éléments, de manière à satisfaire à la condition précédente.

L'accumulateur sera chargé lorsque l'hydrogène mis en liberté par le courant de charge cessera d'être absorbé par l'électrode négative et se dégagera à l'état de bulles.

La quantité d'hydrogène absorbé, à un moment donné de la charge, par la lame négative est d'ailleurs proportionnelle à la quantité d'électricité qui a traversé l'accumulateur.

On peut exprimer la charge d'un accumulateur par une quantité d'électricité. Si, par exemple, un accumulateur a été chargé par un courant de 0.5 ampère qui a passé pendant 30 heures, on dira que la charge est de

$$60 \times 60 \times 30 \times 0.5 = 54000 \text{ coulombs.}$$

En appelant *ampère-heure* la quantité, 3600 coulombs, qu'un courant de 1 ampère fait circuler en une heure à travers une section quelconque d'un circuit, on pourra dire aussi que la charge de l'accumulateur est de

$$30 \times 0.5 = 15 \text{ ampères-heure.}$$

Un accumulateur conserve sa charge pendant longtemps, sans perte considérable, si les deux lames de plomb ne sont pas réunies entre elles.

Lorsqu'on veut charger simultanément plusieurs accumulateurs avec un petit nombre d'éléments de pile, il faut réunir ces accumulateurs en batterie, de manière à satisfaire à la condition énoncée plus haut quant à la force électromotrice.

Décharge d'un accumulateur. — On décharge un accumulateur en réunissant ses deux lames de plomb par un conducteur.

Si l'accumulateur était parfait et si aucune partie de l'énergie du courant primitif n'était absorbée par l'échauffement des divers conducteurs traversés, le courant de décharge devrait fournir une quantité d'électricité égale à celle du courant primitif. En réalité, il n'en est pas ainsi, et le rendement d'un accumulateur ne dépasse pas 75 p. 100.

La quantité Q d'électricité que l'accumulateur est capable de fournir peut d'ailleurs être dépensée en un temps plus ou moins long suivant la résistance du circuit dans lequel on fait circuler cette électricité. Si, en effet, on fait passer le courant à travers un circuit de résistance totale égale à R , l'intensité du courant de décharge est :

$$I = \frac{E}{R},$$

et comme $Q = It$, t étant la durée du courant, on peut écrire :

$$Q = \frac{E}{R} t, \quad \text{d'où : } t = \frac{RQ}{E}.$$

La durée t du courant de décharge est donc proportionnelle à la résistance totale R ; l'intensité I est par contre inversement proportionnelle à cette résistance.

Il importe de remarquer que, les électrodes ayant une très grande surface et étant très rapprochées, la résistance intérieure de l'accumulateur est toujours très faible, si bien que si la résistance du circuit intermédiaire est elle-même assez faible, le courant fourni par l'accumulateur peut être beaucoup plus intense que celui que donneraient, dans les mêmes conditions, les piles qui ont servi à le charger.

Il importe de remarquer en outre que, si l'on a chargé plusieurs accumulateurs en les associant en batterie, on peut, en les groupant ensuite en série, obtenir des effets que la pile employée à la charge n'aurait pu produire. Supposons, en effet, qu'on ait employé 2 éléments Bunsen, de force électromotrice égale à 1.8 volts, associés en série, à charger une batterie de 10 accumulateurs de force électromotrice égale à 2 volts. Si l'on associe ensuite ces accumulateurs en série, on disposera d'une force électromotrice de $2 \times 10 = 20$ volts, alors que les deux éléments Bunsen ne

donnaient qu'une force électromotrice égale à $2 \times 1.8 = 3.6$ volts.

La grande intensité de courant et la grande force électromotrice que peuvent donner, dans les conditions que nous venons d'indiquer, des piles secondaires chargées par un courant d'intensité moindre dû à une force électromotrice relativement faible, justifient les noms d'*accumulateurs* ou de *transformateurs* que l'on donne généralement à ces piles.

Les accumulateurs sont souvent employés dans l'industrie comme *réservoirs* d'électricité pour régler la constance du courant fourni par une source à débit irrégulier. Comme ils sont peu encombrants, eu égard à la quantité d'électricité qu'ils peuvent fournir, et qu'ils sont transportables, on peut, après les avoir chargés dans une usine, les placer sur des tramways qu'ils serviront à actionner, ou les porter dans une maison dans laquelle ils serviront à fournir l'éclairage électrique.

Les accumulateurs sont également utilisés, en Médecine, pour porter à l'incandescence de gros galvanocautères que l'on ne pourrait faire rougir, avec les piles ordinaires, qu'en prenant un nombre très considérable d'éléments.

664. Phénomènes électrocapillaires. — La surface des électrodes étant modifiée par la polarisation, on conçoit que les propriétés qui, comme la tension superficielle, dépendent de l'état de cette surface soient également modifiées dans ces conditions.

C'est ce qu'a montré Lippmann en prenant pour électrodes deux masses de mercure. Il s'est servi à cet effet d'un tube capillaire deux fois recourbé et soudé à l'une de ses extrémités à un tube plus large. Le tube large et la partie du tube capillaire qui lui fait suite contiennent du mercure; l'autre partie du tube capillaire est remplie d'eau acidulée. On plonge l'extrémité du tube capillaire dans un vase contenant du mercure surmonté d'eau acidulée, et l'on met en communication métallique le mercure du vase et celui du tube large de façon que les deux masses soient au même potentiel. Par suite des actions capillaires et du poids de la colonne liquide qui la surmonte, la surface mercurielle est située plus bas dans le tube capillaire que dans le tube large; on note la position d'équilibre de cette surface. Si l'on rompt alors la communication établie entre les deux masses de mercure et si l'on fait aboutir dans le tube large le pôle négatif et dans le vase le pôle positif d'une pile, on voit le mercure s'abaisser dans le tube capillaire; comme d'ailleurs la forme du ménisque reste sensiblement sphé-

rique, il faut admettre que la polarisation a amené une augmentation dans la tension superficielle de la surface de contact eau-acidulée—mercure. Lippmann a trouvé que la valeur de cette tension présentait son maximum lorsque la différence de potentiel des deux surfaces mercurielles était de 0.9 volt; on n'a pas pu du reste étudier les variations de cette tension pour des différences de potentiel supérieures à 2 volts, parce que l'eau acidulée est alors décomposée.

Lippmann a montré en outre que ces phénomènes sont réversibles et qu'il suffit de déformer la surface de contact eau-acidulée—mercure, pour faire naître une force électromotrice qui tend à donner à cette surface sa courbure primitive. On peut même obtenir un véritable électromoteur en plaçant, au-dessus d'un vase contenant du mercure et de l'eau acidulée, un entonnoir effilé rempli de mercure et disposé de telle sorte que sa pointe plonge dans l'eau acidulée. Le mercure s'écoulant goutte à goutte de l'entonnoir dans le vase produit des modifications des deux surfaces de contact eau-acidulée—mercure, modifications qui ont pour effet de maintenir entre ces deux surfaces une différence de potentiel capable de donner naissance à un courant, lorsque les deux masses mercurielles sont réunies par un fil conducteur.

665. **Électromètre capillaire de Lippmann.** — Lippmann a utilisé la variation que subit la tension superficielle de la surface eau-acidulée—mercure, par suite de la polarisation de cette surface, dans la construction d'un électromètre doué d'une grande sensibilité.

Cet instrument (fig. 403) se compose d'un tube vertical contenant du mercure et terminé par une pointe très effilée qui plonge dans de l'eau, acidulée par SO_4H^2 et contenue dans un vase B au fond duquel se trouve une couche de mercure. Cette partie de l'appareil, représentée à part sur la figure 404, est fixée à une planchette verticale portée par un socle auquel est annexé un sac à air en caoutchouc T (fig. 403) qui communique, d'une part, avec la partie supérieure du tube à mercure au moyen d'un tube incomplètement représenté sur la figure 403, d'autre part, avec un tube manométrique H. Deux bornes α et β sont reliées au moyen de fils métalliques, l'une au mercure du tube vertical, l'autre au mercure du vase B, et peuvent être réunies aux points dont on veut mesurer la différence de potentiel; enfin un microscope M, porté par le socle de l'appareil, sert à observer le ménisque du mercure dans la partie capillaire du tube vertical.

Le mode opératoire est le suivant. On comprime, au moyen de la manivelle E, l'air du sac en caoutchouc, de manière à amener l'image du ménisque de mercure en coïncidence avec un fil réticulaire horizontal dont le microscope est muni, et l'on note la pression indiquée par le manomètre H. On met alors les bornes α et β en communication avec les points pour lesquels on veut mesurer la différence de potentiel; le pôle +, c'est-à-dire le point dont le

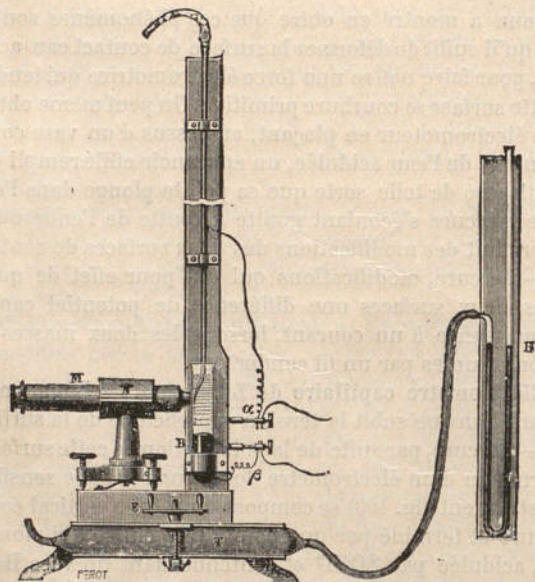


Fig. 403. — Électromètre capillaire de Lippmann.

potentiel est le plus élevé, doit d'ailleurs être toujours réuni à la borne β , car si on le faisait aboutir à la borne α , l'oxygène se dégagerait sur le ménisque du mercure dans le tube capillaire et l'oxyderait, ce qui mettrait l'instrument hors d'usage.

Les communications convenablement établies, il se produit dans le tube une dénivellation du ménisque qui est due à l'augmentation de valeur de la tension superficielle de la surface eau-acidulée-mercure, tension dont la composante normale faisait équilibre au poids de la colonne mercurielle maintenue dans le tube.

On peut faire déplacer le ménisque en sens inverse à l'aide d'une force électromotrice inverse de celle qui a produit la dénivellation et dont la valeur soit variable au gré de l'opérateur. La valeur qu'il faut donner à cette force pour ramener le ménisque à sa position primitive fait alors connaître directement la valeur de la force électromotrice à mesurer.

On peut également ramener le ménisque à son point de départ en augmentant, au moyen de la manivelle E qui agit sur le sac à air T, la pression que supporte la surface libre du mercure dans le tube. La nouvelle valeur de cette pression, indiquée par le manomètre H, fait connaître alors la différence de potentiel cherchée, si l'on a préalablement établi la graduation de l'instrument.

On établit cette graduation en mettant les bornes α et β en communication avec des points dont la différence de potentiel puisse être modifiée et déterminée, et notant chaque fois la pression nécessaire pour ramener le ménisque de mercure à son niveau primitif. Cette graduation ne sert évidemment d'ailleurs que pour la hauteur de mercure du tube vertical pour laquelle elle a été établie.

La pression nécessaire pour maintenir le ménisque dans sa position primitive augmente tant que la tension superficielle augmente elle-même; elle croît donc, comme le démontrent du reste les nombres déterminés par le procédé que nous venons d'indiquer, jusqu'au moment où la différence des potentiels en α et β atteint une valeur de 0.9 volt et diminue ensuite. L'instrument ne doit donc être employé qu'à la mesure des forces électromotrices inférieures à cette valeur 0.9 volt.

On peut, avec cet électromètre, apprécier des forces électromotrices de $\frac{1}{10000}$ de volt.

666. **Actions cataphoriques.** — Il convient de rattacher aux phénomènes d'électrolyse les actions *cataphoriques* ou de transport de liquides, qui sont engendrées par le courant électrique et qui ont

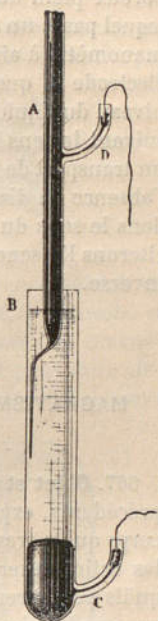


Fig. 404. — Tube et cuvette de l'électromètre capillaire.

été observées pour la première fois par Reuss et par Porret.

Dans un vase contenant de l'eau acidulée, on introduit un vase poreux plein du même liquide et fermé par un bouchon à travers lequel passe un tube, ouvert aux deux bouts; ce tube constitue un manomètre à air libre. Si les deux vases sont munis chacun d'une électrode et que l'on fasse passer un courant, on constate que le niveau du liquide s'élève ou s'abaisse dans le tube manométrique suivant le sens du courant; le passage du courant détermine donc un transport de liquide. Ce transport, qui peut s'observer même en l'absence de diaphragme poreux (Quincke), se fait généralement dans le sens du courant; quelques liquides, parmi lesquels nous citerons l'essence de térébenthine, se transportent pourtant en sens inverse.

CHAPITRE VIII

MAGNÉTISME, ÉLECTRO-MAGNÉTISME ET ÉLECTRO-DYNAMIQUE

667. **Objet et plan du Chapitre.** — Après avoir, dans les Chapitres précédents, exposé les actions que les courants exercent sur les corps qu'ils traversent, nous étudierons, dans le présent Chapitre, les actions exercées par ces mêmes courants, au dehors du circuit qu'ils parcourent, sur les *aimants* et les corps dits *magnétiques*, ainsi que sur les circuits traversés eux-mêmes par un courant.

Ces deux catégories de phénomènes présentent, en effet, de telles analogies que leur étude doit être faite parallèlement. A cet effet, après avoir donné des notions générales de *magnétisme*, c'est-à-dire après avoir indiqué les propriétés générales des aimants, nous exposerons successivement les lois principales de l'*électro-magnétisme* ou de l'action des courants sur les aimants, puis celles de l'*électro-dynamique*, ou de l'action des courants sur les courants. L'analogie complète des lois qui régissent ces deux catégories de phénomènes nous conduira à la théorie du magnétisme qu'Ampère a logiquement déduite de cette analogie, qu'il avait lui-même établie.

668. **Aimants naturels et artificiels.** — On trouve dans la nature des échantillons d'oxyde de fer Fe^3O^4 qui jouissent de la propriété d'attirer la limaille de fer par certains de leurs points. Ces échantillons, auxquels on a donné le nom d'*aimants naturels*, auraient

été rencontrés pour la première fois aux environs de *Magnésie*, d'où le nom de *magnétisme* employé pour désigner la cause des phénomènes dont les aimants sont le siège.

Les aimants naturels peuvent du reste, sans subir eux-mêmes aucune modification, communiquer leurs propriétés à l'acier par

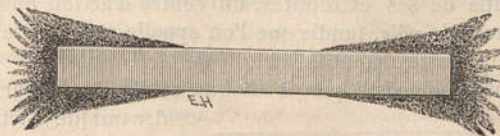


Fig. 405. — Barreau aimanté.

simple frottement. On peut obtenir ainsi des *aimants artificiels* de forme plus simple et plus régulière que les aimants naturels, et dont l'emploi est plus commode, soit pour l'étude du magnétisme, soit pour les diverses applications que l'on peut faire des propriétés des aimants. Les aimants artificiels sont généralement

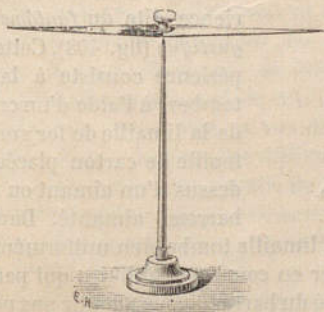


Fig. 406. — Aiguille aimantée.

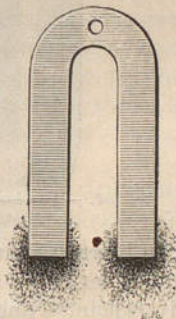


Fig. 407. — Aimant en fer à cheval.

constitués par des barreaux (fig. 405), par des aiguilles (fig. 406), par des lames recourbées en forme d'U ou de fer à cheval (fig. 407).

669. **Pôles des aimants.** — L'attraction que les aimants exercent sur le fer se produit à distance; elle est en outre réciproque, et, si le fer est maintenu fixe tandis que l'aimant est rendu mobile, c'est le fer qui attire l'aimant. L'action magnétique se manifeste d'ailleurs aussi bien dans le vide que dans l'air et se transmet intégralement à travers le papier, le carton, le verre, etc.; le fer seul peut, sous une épaisseur convenable, jouer le rôle d'écran.

L'action qu'un aimant exerce n'émane pas d'ailleurs de tous ses points; lorsque, en effet, on plonge un barreau aimanté dans de la limaille de fer, celle-ci s'attache en plus grande quantité aux deux extrémités du barreau et ne se fixe nullement sur la partie médiane, comme le montre la figure 403. Le barreau paraît donc présenter, vers chacune de ses extrémités, un centre d'action auquel on a donné le nom de *pôle*, tandis que l'on appelle *zone neutre* la partie médiane qui n'attire point la limaille de fer.

En réalité il n'existe pas, à chaque extrémité du barreau, un centre unique d'action, mais une foule de points possédant des *quantités variables de magnétisme*, c'est-à-dire jouissant à des degrés divers de la propriété d'attirer la limaille de fer, comme le montre la répartition de cette limaille dans l'expérience dite du *fantôme magnétique* (fig. 408). Cette expérience consiste à laisser tomber, à l'aide d'un crible, de la limaille de fer sur une feuille de carton placée au-dessus d'un aimant ou d'un barreau aimanté. Dans le

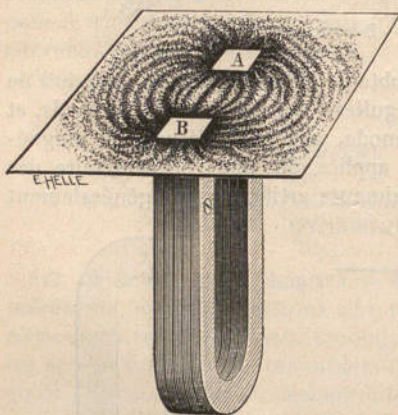


Fig. 408. — *Fantôme magnétique.*

cas d'un barreau aimanté, si la limaille tombe bien uniformément, on en voit les grains se disposer en courbes régulières qui partent des divers points d'une extrémité du barreau pour aboutir aux points symétriques de l'autre extrémité. La formation de ces courbes est facilitée, si l'on imprime à la feuille de carton de petites secousses.

On rencontre parfois des barreaux aimantés qui possèdent des centres d'action intermédiaires à ceux qui constituent les pôles. Ces barreaux sont dits *irréguliers*, et les nouveaux centres d'action sont appelés *points conséquents*. Il y a toujours une *zone neutre* entre un point conséquent et un pôle ou entre deux points conséquents consécutifs.

670. *Distinction des pôles.* — Un barreau aimanté suspendu autour d'un axe vertical, de manière à pouvoir tourner librement dans un plan horizontal, ne reste point en équilibre dans toutes les

positions dans lesquelles on le place, comme le ferait un fragment de métal non magnétique dans les mêmes conditions; la ligne qui joint les pôles de l'aimant, et qui a reçu le nom d'*axe magnétique*, prend une direction invariable dans l'espace, direction qui est la même en un même lieu pour tous les aimants suspendus de la façon que nous venons d'indiquer. Le plan vertical qui contient l'axe du barreau lors de sa position d'équilibre a reçu le nom de *méridien magnétique* du lieu considéré. L'angle que fait ce méridien avec le méridien géographique en ce même lieu est toujours assez petit; on lui a donné le nom d'angle de *déclinaison*. C'est, en outre, toujours la même extrémité du barreau aimanté qui est dirigée vers le nord, d'une part, vers le sud de l'autre; de là les noms de *pôle nord* et de *pôle sud* donnés à chacune des extrémités de l'aimant. Lorsque, au contraire, le barreau est suspendu, dans le plan du méridien magnétique, de telle sorte qu'il puisse tourner librement autour d'un axe horizontal, sa position d'équilibre fait avec l'horizontale un angle que l'on appelle *angle d'inclinaison* et qui suffit, avec le précédent, pour définir exactement la direction que prendrait le barreau si l'on pouvait réaliser un mode de suspension tel qu'il fût mobile dans tous les sens autour de son centre de gravité. Nous reviendrons, en Météorologie, sur la mesure de ces angles d'inclinaison et de déclinaison, et sur la valeur qu'ils présentent au même instant aux différents points du globe ou en un même lieu à des époques différentes.

Si l'on approche d'un aimant mobile un autre aimant dont on a déterminé les pôles par une suspension préalable, on constate que *les deux pôles de même nom se repoussent*, tandis que *les deux pôles de noms contraires s'attirent*.

Ces faits montrent qu'il existe, entre les deux pôles d'un aimant, des différences bien nettes, et conduisent à admettre l'existence de deux espèces de magnétisme, le *magnétisme nord* qui serait distribué sur l'extrémité nord de l'aimant, et le *magnétisme sud* qui serait réparti sur l'extrémité sud.

Mais, de même que l'hypothèse analogue faite au début de ce Livre et relative à deux espèces d'électricité, l'hypothèse qui consiste à admettre l'existence de deux espèces de magnétisme ne doit être considérée que comme une manière commode d'exprimer certains faits et non comme une conception répondant à la réalité des phénomènes.

671. Lois des attractions et des répulsions magnétiques. —

Lorsqu'on veut déterminer les lois des attractions et des répulsions qu'exercent l'un sur l'autre les pôles, mis en regard, de deux aimants, il est nécessaire de se placer dans des conditions telles que les deux autres pôles des deux aimants n'interviennent pas pour compliquer, par leur action, le phénomène à étudier. On peut arriver à ce résultat en faisant usage d'aimants assez longs pour que les pôles en regard n'éprouvent pas d'action appréciable de la part des deux autres pôles de ces aimants.

C'est à l'aide de la balance de torsion (fig. 357, p. 830), ou encore en évaluant la durée d'oscillation d'une aiguille aimantée mobile autour d'un axe vertical et placée dans le voisinage du pôle d'un aimant fixe, que Coulomb a établi la loi suivante :

Les attractions ou les répulsions qui s'exercent entre deux pôles varient en raison inverse du carré de leur distance.

Si l'on approche successivement, à la même distance d'un même pôle A, les pôles de même nom de divers aimants, on observe que la force attractive ou répulsive f varie avec les aimants employés. On dit que la *quantité de magnétisme* ou la *masse magnétique* d'un pôle B est double, triple... de celle d'un autre C, lorsque la force attractive ou répulsive de B sur le pôle A est, pour la même distance, double, triple.... de celle de C sur A ; il résulte de cette définition même que *les forces magnétiques sont proportionnelles aux masses magnétiques entre lesquelles elles s'exercent.*

672. Unité de magnétisme. — Dans le système C.G.S., on est convenu de prendre pour unité de masse magnétique celle qui, agissant sur une masse égale placée à un centimètre de distance, l'attire ou la repousse avec une force égale à une dyne. Cette unité n'a pas reçu de nom, mais elle sert de base au *système électro-magnétique* d'unités adopté par le Congrès international des électriciens en 1881.

D'après les lois des actions magnétiques, la force qui s'exerce entre deux pôles, de masses magnétiques m et m' , placés à une distance r sera donnée en *dynes* par la formule :

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

si m et m' sont exprimées en unités C.G.S. de magnétisme et r en centimètres. Cette force sera d'ailleurs répulsive ou attractive, suivant que les deux masses m et m' représenteront des magnétismes de même nom ou de noms contraires. Comme pour les masses électriques, on est convenu d'affecter les masses magnétiques du signe +

et du signe — ; on considère comme positives celles qui correspondent au magnétisme du pôle nord des aimants, comme négatives, celles qui correspondent au magnétisme du pôle sud. La force f est alors répulsive ou attractive, suivant qu'elle est positive ou négative.

673. **Constitution des aimants.** — L'expérience montre que si l'on coupe en deux parties une aiguille aimantée, les deux fragments constituent chacun un aimant complet avec deux pôles et une zone neutre ; chacun des deux aimants ainsi obtenus donne de même par rupture deux nouveaux aimants, et ainsi de suite. Nous concluons provisoirement de là que chaque molécule d'un aimant doit être regardée comme un aimant élémentaire complet. Les effets produits par un barreau d'acier, par exemple, apparaissent alors comme la résultante des actions dues à ces aimants moléculaires ; le barreau sera par suite sans action si tous ces aimants élémentaires sont orientés d'une façon quelconque, et sera au contraire aimanté si, par un procédé quelconque, on parvient à orienter la majeure partie de ces aimants élémentaires dans le même sens.

674. **Aimantation par influence.** — Il suffit de placer un barreau d'acier A dans le voisinage et sur le prolongement d'un aimant B pour le voir présenter, au bout d'un certain temps, des phénomènes d'aimantation. Les pôles du nouvel aimant sont d'ailleurs orientés dans le même sens que ceux de l'aimant qui lui a donné naissance, car les deux extrémités en regard de A et de B présentent des pôles de noms contraires. On dit que le barreau d'acier s'est aimanté *par influence* ; l'aimantation ainsi produite se conserve du reste en grande partie après que l'action de l'aimant auquel elle est due a cessé de s'exercer.

On observe des phénomènes analogues si l'on répète la même expérience en substituant au barreau d'acier un barreau de fer doux. Le fer doux s'aimante et présente deux pôles orientés comme ceux de l'aimant ; il peut même agir par influence sur un second barreau identique placé à sa suite. L'aimantation du fer doux par influence précède d'ailleurs son attraction par l'aimant et permet d'en rendre compte.

Tandis que l'aimantation de l'acier par influence demande un certain temps pour se produire, celle du fer doux a lieu instantanément ; elle est en outre beaucoup plus énergique que celle de l'acier, mais elle cesse dès qu'on éloigne l'aimant influençant, si le fer est chimiquement pur. En réalité, il n'en est jamais rigoureusement

ment ainsi, et le fer conserve, suivant qu'il a été plus ou moins écroui, ou suivant qu'il renferme plus ou moins d'impuretés, une portion plus ou moins grande de l'aimantation qui s'y est développée par influence. On qualifie de *temporaire* le magnétisme qui cesse en même temps que l'influence, tandis que l'on appelle *rémanent* celui qui persiste après la disparition de la cause qui l'a produit. La propriété que possèdent l'acier et certaines variétés de fer, de conserver ainsi une partie du magnétisme développé par influence, lorsqu'ils ne sont plus soumis à cette influence, a reçu le nom de *force coercitive*; on peut donc exprimer les différences que nous venons de signaler entre le fer doux, les différentes variétés de fer et l'acier en disant que le fer absolument doux n'a pas de force coercitive, tandis que les autres variétés de fer et l'acier sont doués de cette force à des degrés divers. La force coercitive, qui est surtout développée dans l'acier, présente des valeurs différentes pour les divers aciers; elle est en général d'autant plus grande que l'acier a été trempé à une température plus élevée et a subi un refroidissement plus brusque.

675. **Procédés d'aimantation.** — L'aimantation permanente que prend l'acier par influence est utilisée pour préparer les aimants artificiels; on a surtout recours aujourd'hui à l'action des courants qui permet, comme nous le verrons plus loin, d'obtenir facilement des aimants puissants; mais on peut également préparer des aimants en faisant agir sur le barreau à aimanter un ou plusieurs barreaux déjà fortement aimantés. On facilite d'ailleurs l'aimantation de l'acier en le soumettant à des actions mécaniques telles que chocs, vibrations, etc., pendant qu'il est sous l'influence des aimants.

On peut aimanter un barreau d'acier, par exemple par *simple touche* ou par *double touche séparée*.

Dans le premier cas, on frictionne le barreau à aimanter d'une extrémité à l'autre toujours dans le même sens avec l'un des pôles d'un aimant puissant. Après un certain nombre de frictions, le barreau est fortement aimanté et présente, à l'extrémité par laquelle ont débuté toutes les frictions successives, un pôle de même nom que celui qui a été utilisé pour les frictions, tandis qu'un pôle de nom contraire s'est formé à l'autre extrémité.

Dans la méthode de la double touche séparée, on place les deux pôles de noms contraires de deux forts aimants au milieu du barreau à aimanter et on les écarte simultanément jusqu'aux deux

extrémités du barreau; puis on replace les deux pôles au milieu du barreau et l'on recommence l'opération. Il se développe dans ces conditions un pôle nord à l'extrémité du barreau frictionnée avec un pôle sud et *vice versa*. Pour obtenir une aimantation plus intense, on place, en général, chacune des extrémités du barreau sur un pôle de même nom que celui de l'aimant avec lequel on la frictionne.

L'aimantation de l'acier ne se produisant que dans les couches superficielles, on a avantage, pour obtenir des aimants puissants, à aimanter séparément de minces lames d'acier et à les juxtaposer ensuite en plaçant côte à côte leurs pôles de même nom. Les lames peuvent du reste être rectilignes ou recourbées; la figure 409 représente un aimant construit d'après ces principes (aimant Jamin).

Pour conserver les barreaux aimantés, on les place deux à deux parallèlement dans une boîte, les pôles de noms contraires en regard et réunis par des pièces de fer doux. Quand l'aimant a la forme d'un fer à cheval, ses deux pôles sont voisins l'un de l'autre et il suffit alors de réunir ces pôles par une pièce de fer doux qui a reçu le nom d'*armature*.

676. **Corps magnétiques et diamagnétiques.** — Le fer et l'acier ne sont pas les seuls corps capables d'être influencés par les aimants. La plupart des corps jouissent en effet de cette propriété, mais tandis que les uns, au nombre desquels nous citerons le nickel, le cobalt, le platine, etc., sont attirés comme le fer, les autres comme le bismuth, l'antimoine, etc., sont repoussés dans les mêmes conditions; les corps de la première catégorie sont dits *magnétiques* et ceux de la seconde sont qualifiés de *diamagnétiques*. Toutefois, ces phénomènes d'attraction et de répulsion sont, en général, si faibles qu'il faut avoir recours à une disposition spéciale pour les mettre en évidence.

Un barreau du corps à étudier est pour cela suspendu par son milieu à égale distance entre deux pôles d'un puissant aimant en fer à cheval. Si le corps est magnétique, comme le fer, il s'aimante et le barreau se place suivant la direction de la ligne qui joint les deux pôles; on dit qu'il prend la direction *axiale*. Lorsque le corps

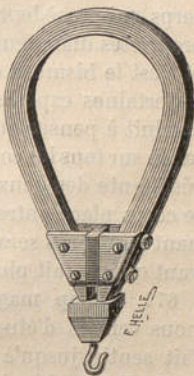


Fig. 409. — Aimant Jamin.

est diamagnétique comme le bismuth, le barreau prend une direction *équatoriale*, c'est-à-dire perpendiculaire à la précédente.

Les résultats ainsi obtenus ont conduit à admettre qu'aucun corps solide, liquide ou gazeux n'était insensible à l'action des aimants et que tous pouvaient se ranger dans l'une des deux catégories dont nous venons de parler. Le fer, le nickel, le cobalt sont les seuls corps qui possèdent à un haut degré la propriété magnétique; les propriétés diamagnétiques sont, d'autre part, toujours très faibles, et c'est le bismuth qui les possède au degré le plus élevé.

Certaines expériences, qu'il n'y a pas lieu de rapporter ici, ont conduit à penser que l'action magnétique s'exercerait de la même façon sur tous les corps, et que les effets observés ne seraient que la résultante des deux actions exercées par l'aimant, d'une part, sur le corps placé entre ses pôles et, d'autre part, sur le milieu environnant; un corps serait dès lors magnétique ou diamagnétique, suivant qu'il serait plus ou moins magnétique que le milieu ambiant.

677. **Champ magnétique.** — Les phénomènes d'influence que nous venons d'étudier montrent que la présence d'un aimant se fait sentir jusqu'à une certaine distance dans l'espace environnant; l'ensemble des points où s'exerce cette action a reçu le nom de *champ magnétique*.

De l'identité des formules $f = \frac{qq'}{d^2}$ (§ 608) et $f = \frac{mm'}{r^2}$ (§ 672), qui expriment l'action réciproque de deux masses électriques et de deux masses magnétiques situées à une distance d ou r , on doit conclure que les propositions établies dans le chapitre II (p. 842 et suiv.), relativement au champ électrique sont applicables au champ magnétique. Il faut remarquer seulement que les masses magnétiques nord et sud, qui sont respectivement assimilables à des masses d'électricité positive et négative, sont toujours fixes de position et qu'elles ne tendent point à se déplacer, comme les masses électriques à la surface des conducteurs.

Il y aura donc à considérer, pour définir un champ magnétique, l'intensité de ce champ, ses lignes de force, la valeur du potentiel en chaque point, valeur qui se calculera comme celle du potentiel électrique, et les surfaces de niveau ou équipotentielles.

L'*intensité* en un point d'un *champ magnétique* est la valeur de la force qui s'exercerait sur l'unité de magnétisme nord placée en ce point, et les *lignes de force* sont des lignes tangentes en chaque point à la direction de la force magnétique en ce point. Les deux

extrémités d'une même ligne de force aboutissent toujours à deux points possédant des magnétismes de noms contraires, mais ces lignes de force magnétiques ne sont pas, comme les lignes de force électriques, normales à la surface des corps sur lesquelles elles aboutissent. On définit leur sens en les considérant comme toujours dirigées d'un pôle nord à un pôle sud. La direction d'une ligne de force en un point du champ est donc la direction dans laquelle tend à être entraîné un pôle nord libre placé en ce point. Un pôle sud placé au même point tendrait à être entraîné en sens inverse de la ligne de force. Il est facile de déterminer la direction de la ligne de force en un point d'un champ magnétique, en plaçant en ce point une petite aiguille aimantée mobile autour de son centre de gravité; les deux pôles de cette aiguille étant suffisamment rapprochés pour qu'on puisse les considérer comme sensiblement au même point, ces pôles seront soumis à deux forces contraires f_1, f_2 dont la valeur commune dépendra de l'intensité du champ et des masses magnétiques des deux pôles. L'aiguille tournera donc jusqu'à ce que les deux forces f_1, f_2 soient directement opposées et sa direction sud-nord sera alors celle de la ligne de force au point considéré.

L'expérience des fantômes magnétiques permet de se rendre compte également de la disposition des lignes de force dans un champ; les courbes dessinées par la limaille sont précisément ces lignes de force.

Les lignes de force peuvent être utilisées, non seulement pour représenter la direction de la force magnétique en chaque point du champ, mais encore pour représenter l'intensité de cette force; il suffit d'admettre que le nombre de ces lignes est proportionnel à cette intensité. L'action exercée sur un corps placé dans un champ magnétique est alors en effet d'autant plus énergique que ce corps est rencontré par un plus grand nombre de lignes de force.

Il résulte de ce qui précède qu'un *champ uniforme*, c'est-à-dire un champ dans lequel la force magnétique présente, en chaque point, même valeur et même direction, sera représenté par des lignes de force rectilignes, parallèles et également espacées.

Par suite de l'unité choisie pour mesurer les masses électriques et les masses magnétiques, les champs dus à des masses électriques ou à des masses magnétiques de même valeur numérique et semblablement placées sont absolument identiques quant à la valeur et à la disposition de leurs divers éléments; mais ces champs

ne sont nullement identiques au point de vue de leurs propriétés. Une masse magnétique n'est en effet soumise à aucune action dans un champ électrique et réciproquement.

678. **Champ magnétique terrestre.** — L'orientation d'un aimant, en l'absence de toute cause étrangère qui puisse donner naissance à un champ magnétique, démontre l'existence d'un champ magnétique dans l'espace qui nous environne ; on attribue l'origine de ce champ à la terre même et on lui donne le nom de *champ magnétique terrestre*. Ce champ magnétique, que nous étudierons plus complètement en Météorologie, peut du reste être regardé comme uniforme, tant que l'on ne considère que des points peu éloignés l'un de l'autre ; dans ces conditions, en effet, la direction que prend une aiguille aimantée suspendue par son centre de gravité est invariable.

679. **Définition précise des pôles d'un aimant. Égalité de ses deux magnétismes.** — Considérons un aimant placé dans un champ magnétique, le champ magnétique terrestre par exemple, que l'on puisse considérer comme uniforme dans tout l'espace occupé par l'aimant et soit f l'intensité du champ dans cet espace. Les masses de magnétisme nord, ou les masses positives m, m', m'', \dots que possèdent les divers points de l'aimant, seront soumises à des forces fm, fm', fm'', \dots , toutes parallèles à la direction du champ et de même sens. La grandeur et le point d'application de ces forces seront du reste invariables dans l'aimant, quelle que soit la position de celui-ci dans l'espace considéré. Ces forces auront donc une résultante unique, appliquée en un certain point de l'aimant, parallèle à leur direction, dirigée dans le même sens qu'elles, et dont la valeur F , égale à leur somme, sera donnée par la formule :

$$F = fm + fm' + fm'' \dots = fM,$$

en désignant par M la somme des masses positives.

De même, les forces qui agissent sur les masses de magnétisme sud ou masses négatives m_1, m'_1, m''_1, \dots , forces qui sont parallèles aux précédentes, mais dirigées en sens inverse, ont une résultante unique, parallèle à leur direction, dirigée dans le même sens qu'elles, appliquée en un certain point de l'aimant et dont la valeur F_1 est donnée par la formule :

$$F_1 = fm_1 + fm'_1 + fm''_1 \dots = fM_1,$$

en désignant par M_1 la somme des masses négatives.

Lorsqu'un aimant est dans un champ uniforme, on peut donc le

considérer comme soumis à deux forces F et F_1 , parallèles et de sens contraires, appliquées en deux points fixes qui constituent les deux pôles de l'aimant; dès lors, les choses se passent comme si les sommes M et M_1 des masses magnétiques positives et négatives étaient concentrées en chacun de ces pôles.

L'expérience montre d'ailleurs que l'action subie par un aimant dans un champ magnétique uniforme est purement directrice, et qu'elle se réduit à un couple, c'est-à-dire que les deux forces F et F_1 , parallèles et de sens contraires, qui agissent sur les deux pôles, sont égales. En effet, une aiguille d'acier présente rigoureusement le même poids avant et après l'aimantation; l'action résultante du champ magnétique terrestre sur les deux pôles d'un aimant n'a donc pas de composante verticale; en outre, cette action n'a pas de composante horizontale, car un aimant placé sur un flotteur en liège à la surface d'une eau tranquille s'oriente dans la direction nord-sud sans subir aucun mouvement de translation. L'absence démontrée de composante horizontale et de composante verticale élimine évidemment la possibilité de l'existence d'une composante oblique, puisque celle-ci pourrait toujours être décomposée en une force horizontale et en une force verticale.

L'égalité des deux forces F et F_1 entraîne, d'ailleurs, celle des deux masses M et M_1 ; par suite, un aimant renferme la même quantité de magnétisme nord et de magnétisme sud.

680. **Moment d'un aimant.** — Si l'on désigne par m la masse absolue de chaque pôle d'un aimant, et par $2d$ la distance des deux pôles, le produit $2dm$ est ce qu'on appelle le *moment de l'aimant*; on le désigne par M . Si un aimant, de moment $M = 2dm$, se trouve placé dans un champ magnétique uniforme d'intensité H , il sera soumis à deux forces égales à mH , parallèles et de sens contraires, et le moment de ce couple sera égal à

$$2dm H \sin \alpha = MH \sin \alpha,$$

en désignant par α l'angle que font avec l'axe du barreau les lignes de force du champ (fig. 410).

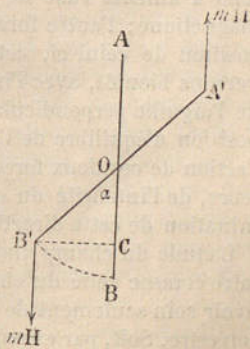


Fig. 410. — Couple directeur d'un aimant dans un champ uniforme.

681. **Action des courants sur les aimants. Champ magnétique dû à un courant.** — Oersted observa le premier, en 1819, que si l'on place une aiguille aimantée mobile dans le voisinage d'un conducteur fixe traversé par un courant, l'aiguille tend à prendre une direction perpendiculaire à celle du conducteur. Le sens de la dé-

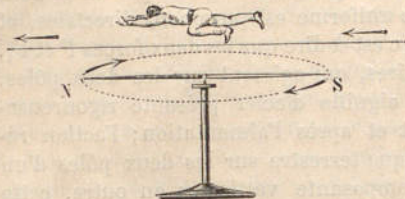


Fig. 411. — Observateur d'Ampère.

viation de l'aiguille est du reste donné par la loi suivante due à Ampère :

Le pôle nord de l'aiguille est toujours dévié à la gauche du courant. On appelle gauche du courant la gauche d'un observateur qui, couché le long du courant de façon que ce-

lui-ci entre par ses pieds et sorte par sa tête, regarderait l'aiguille (fig. 411). Il résulte de l'expérience d'Oersted, qu'un courant électrique crée autour de lui un champ magnétique.

Une aiguille aimantée placée dans le voisinage d'un courant est donc soumise à deux forces; l'une de ces forces, due au champ magnétique terrestre, est invariable pour une même aiguille et tend à amener l'axe de l'aiguille dans la direction du méridien magnétique; l'autre force est due au courant; pour une même position de celui-ci, cette seconde force varie, comme nous le verrons bientôt, avec l'intensité du courant, et tend à placer l'axe de l'aiguille perpendiculairement à la direction de ce courant. La position d'équilibre de l'aiguille est par suite celle qui résulte de l'action de ces deux forces, et dépend, toutes choses égales d'ailleurs, de l'intensité du courant; on conçoit dès lors que la détermination de cette direction permette de mesurer cette intensité.

L'étude du champ magnétique dû à un courant peut du reste se faire comme celle du champ magnétique dû à un aimant; il faut avoir soin seulement de neutraliser l'action du champ magnétique terrestre. Soit, par exemple, un conducteur rectiligne xy (fig. 412), que nous supposons assez long pour qu'on puisse le considérer comme indéfini et qui traverse normalement une lame de carton percée d'un trou en son centre; si l'on saupoudre le carton de limaille de fer pendant qu'un courant circule dans le conducteur xy , on voit la limaille se disposer, autour du point où le conducteur traverse la lame, en cercles concentriques, qui indiquent la

disposition des lignes de force du champ. Lorsque le courant circule dans le sens xy , le sens des lignes de force est celui qui est représenté par les flèches courbes ou par la direction sud-nord des petites aiguilles aimantées placées dans le champ. La disposition des lignes de force est du reste la même dans tous les plans menés par chaque point du fil perpendiculairement à la direction de celui-ci.

682. **Action des aimants sur les courants.** — De même qu'un courant crée autour de lui un champ magnétique capable d'influencer un aimant, réciproquement un courant est influencé par le champ magnétique dû à un aimant. Si l'on répète, en effet, l'expérience d'Ørsted en main-

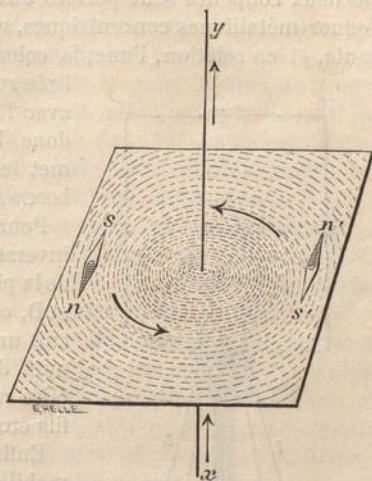


Fig. 412. — Champ magnétique d'un courant rectiligne.

tenant l'aimant fixe et en rendant mobile le conducteur traversé par le courant, c'est le conducteur qui tend à se mettre en croix avec l'aimant, en laissant à sa gauche le pôle nord de l'aimant.

La figure 413 représente une disposition fort analogue à celle qu'a imaginée Ampère pour obtenir un *courant mobile*. Un fil de cuivre, de forme variable suivant l'expérience à réaliser (sur la figure ce fil a la forme d'un rectangle BMNC), aboutit par ses deux extrémités à deux bornes B et C qui sont fixées à la partie supérieure d'une petite rondelle isolante et qui sont en relation avec deux pointes d'acier plantées normalement sur la face inférieure de la même rondelle; l'une de ces pointes, fixée au centre O de la rondelle, repose sur un plan horizontal d'agate qui forme le fond d'une petite coupelle contenant du mercure, tandis que l'autre pointe d'acier, fixée en dessous de la borne C, plonge, sans en toucher le fond, dans une petite coupelle annulaire concentrique à la précédente et remplie comme elle de mercure.

On conçoit que, grâce à cette disposition, le cadre BMNC puisse se mouvoir autour d'un axe vertical passant par O et qu'il puisse

pendant être constamment parcouru par un courant si les deux coupelles sont en relation avec les deux pôles d'une pile. Pour cela, les deux coupelles sont portées aux deux extrémités de deux colonnes métalliques concentriques, séparées par une substance isolante, et en relation, l'une, la colonne centrale, avec la borne A

fixée sur le pied de l'appareil, l'autre, avec la borne D. Le courant suivra donc le chemin AOBMNC si l'on met le pôle positif de la pile à la borne A, et le pôle négatif à la borne D.

Pour faire passer le courant en sens inverse, il suffit d'invertir les pôles de la pile qui aboutissent aux bornes A et D, ou encore de disposer sur le circuit un petit appareil, connu sous le nom de *commutateur*, qui permet de faire cette inversion sans toucher aux fils eux-mêmes.

Enfin, pour rendre stable l'équipage mobile, on suspend à la rondelle isolante de petits poids *p, p* par l'intermédiaire de tiges assez longues *tt*, ce qui amène le centre de gravité du système au-dessous du point de suspension et assure la stabilité.

Si l'on place un aimant au centre du cadre mobile BMNC parcouru par un courant, on voit aussitôt celui-ci s'orienter de façon que son plan soit

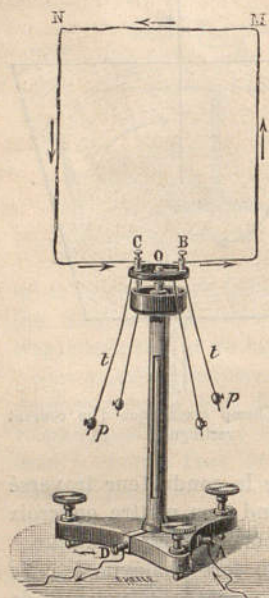


Fig. 413. — Courant mobile.

perpendiculaire à l'axe de l'aimant et que le courant ait le pôle nord à sa gauche; l'action de l'aimant sur les diverses parties du cadre est en effet concordante, comme l'on peut s'en assurer en appliquant à chacune de ces parties la règle d'Ampère.

Lorsqu'on abandonne à lui-même le cadre mobile parcouru par un courant, on voit ce cadre s'orienter sous l'action du champ magnétique terrestre et se maintenir immobile dans une position telle que son plan soit perpendiculaire au méridien magnétique, la branche où le courant est descendant étant d'ailleurs à l'est, et la branche où le courant est ascendant étant à l'ouest de ce méridien. Pour un observateur placé *au sud* et regardant le cadre, le courant

circule donc dans le sens des aiguilles d'une montre, et en sens inverse du mouvement de ces aiguilles pour un observateur placé au nord.

Un circuit plan fermé peut être regardé comme ayant deux faces opposées; nous appellerons désormais *face positive* celle qu'il faut regarder pour voir le courant circuler en sens inverse du mouvement des aiguilles d'une montre, et *face négative* celle qu'il faut regarder pour voir le courant circuler dans le sens même du mouvement de ces aiguilles. Dans l'expérience précédente, le cadre tourne sa face positive au nord, sa face négative au sud.

683. **Loi des actions réciproques entre les aimants et les courants. Unité électro-magnétique d'intensité de courant.** — Ces actions satisfont aux lois suivantes qui ont été énoncées par Laplace à la suite des recherches expérimentales de Biot et Savart :

La force f qui s'exerce entre un pôle d'un aimant et une portion infiniment petite d'un conducteur traversé par un courant varie en raison inverse du carré de la distance r du pôle à l'élément de courant; elle est proportionnelle à la quantité m de magnétisme du pôle, à l'intensité i du courant, à la longueur σ de l'élément de courant et au sinus de l'angle α que fait la direction de cet élément avec la droite qui joint son milieu au pôle.

La force f est donc donnée par la formule :

$$f = K \frac{mi\sigma \sin \alpha}{r^2},$$

en désignant par K une constante qui dépendra de l'unité choisie pour l'intensité du courant.

La force f est en outre appliquée au milieu de l'élément σ , perpendiculairement au plan qui passe par le pôle et le milieu de cet élément; cette force est d'ailleurs dirigée vers la droite ou vers la gauche d'un observateur couché le long de l'élément et regardant le pôle, suivant que l'on considère l'action du pôle sur l'élément de courant ou l'action inverse de l'élément sur le pôle.

L'action d'un élément, de longueur σ , d'un courant circulaire de rayon r parcouru par un courant d'intensité i sur un pôle magnétique de masse m placé en son centre, est donnée par la formule :

$$f = \frac{Kmi\sigma}{r^2},$$

car la droite qui joint le pôle à l'élément est alors normale à la

surface de cet élément, de telle sorte que, α étant égal à 90° , $\sin \alpha$ est égal à 1.

Au lieu de définir l'unité C.G.S. d'intensité de courant comme nous l'avons fait (§ 641), on peut choisir pour cette unité l'intensité du courant qui, en traversant un élément de circuit d'une longueur de 1 centimètre courbé en arc de cercle de 1 centimètre de rayon, exerce une force de 1 dyne sur un pôle de masse magnétique égale à l'unité placé au centre du cercle. Cette unité a reçu le nom d'unité *électromagnétique* d'intensité.

Si l'on exprime l'intensité du courant avec cette unité, la constante K devient égale à 1 et les formules précédentes se réduisent à

$$f = \frac{mi\sigma \sin \alpha}{r^2} \quad \text{et} \quad f = \frac{mi\sigma}{r^2}.$$

684. **Actions des courants sur les courants.** — La production d'un champ magnétique par un courant et l'action d'un champ magnétique, dû à un aimant, sur un courant mobile conduisent à penser que les courants exercent également des actions sur les courants ⁽¹⁾.

La découverte de ces actions et des lois auxquelles elles obéissent est encore due à Ampère.

1° *Deux courants parallèles s'attirent ou se repoussent suivant qu'ils sont de même sens ou de sens inverses.*

Il suffit, pour vérifier l'exactitude de cette loi, d'approcher de l'un des côtés verticaux du cadre BMNC (fig. 413) un conducteur rectiligne traversé par un courant et placé verticalement ⁽²⁾; il y a attraction ou répulsion suivant que les courants parallèles voisins sont de même sens ou de sens inverses. Il faut remarquer toutefois que, par suite de la disposition que nous avons adoptée, l'effet observé sur le cadre mobile est en réalité la résultante des actions du courant fixe sur les diverses parties du cadre; mais les actions qui s'exercent entre les parties les plus rapprochées étant évidemment prépondérantes, ce sont elles qui déterminent le sens

⁽¹⁾ Ces actions sont d'ailleurs absolument distinctes de celles qui s'exercent entre des masses électriques; nous avons déjà appelé l'attention sur ce point à propos du champ magnétique.

⁽²⁾ Il faut d'abord neutraliser l'action du champ magnétique terrestre; on emploie généralement pour cela des circuits mobiles de forme spéciale et telle que les actions de la terre sur les diverses parties du courant se neutralisent.

du mouvement. D'autres dispositions expérimentales permettent d'ailleurs de vérifier la loi avec plus de rigueur.

2° Deux courants non parallèles s'attirent et tendent à se placer parallèlement s'ils s'approchent ou s'éloignent tous deux à la fois de leur point de croisement, ou du pied de leur perpendiculaire commune lorsque les deux courants ne sont pas dans le même plan; les deux courants se repoussent si l'un s'approche de ce point tandis que l'autre s'en éloigne.

On peut vérifier cette loi en plaçant le conducteur fixe horizontalement au-dessus de la partie MN du cadre mobile.

3° Deux éléments consécutifs d'un même courant se repoussent. Cette loi est une conséquence de la précédente.

4° Les actions produites par des courants égaux et de sens contraires sont égales et de sens contraires. On peut s'en assurer en approchant de la branche verticale du cadre BMNC le conducteur AOB (fig. 414) constitué par un fil replié sur lui-même. Ce conducteur est sans action sur le courant mobile, l'action de la partie AO étant détruite par l'action inverse de la partie OB.

Il en est du reste exactement de même si l'une des parties OB du conducteur présente de petites sinuosités, comme on l'a représenté sur la figure 415, l'autre partie AO restant rectiligne; de là la nouvelle loi suivante :

5° Un courant sinueux, à très petites sinuosités, produit la même action qu'un courant rectiligne de même intensité qui s'en écarte infiniment peu et qui aboutit aux mêmes extrémités.

6° L'action qui s'exerce entre deux courants est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelle au produit des intensités de ces courants.

Cette loi peut être vérifiée à l'aide d'un instrument que nous étudierons plus loin sous le nom d'électro-dynamomètre.

685. Solénoïdes. — La forme de circuit qu'Amperé a imaginée, et

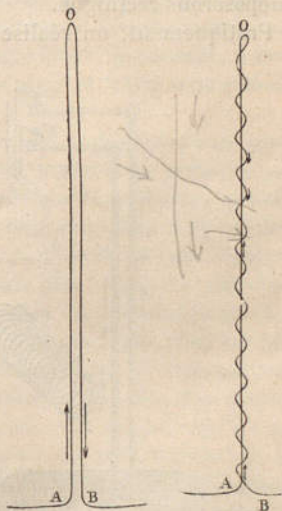


Fig. 414. — Deux courants égaux et de sens contraires.

g. 415. — Courant rectiligne et courant sinueux.

à laquelle il a donné le nom de *solénoïde*, est importante à considérer, en particulier parce que l'étude des propriétés que possède un tel circuit, lorsqu'il est traversé par un courant, conduit à la théorie du magnétisme établie par l'illustre physicien français.

Ampère a donné le nom de *solénoïde* à un ensemble de courants fermés, de même intensité, circulaires, dont les plans sont rapprochés, équidistants et perpendiculaires à un même axe que nous supposerons rectiligne.

Pratiquement, on réalise un solénoïde en enroulant un fil en

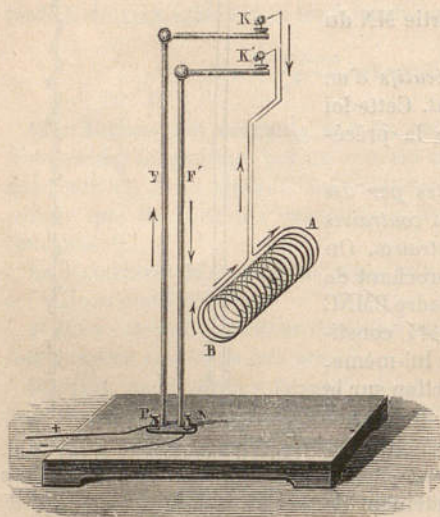


Fig. 416. — Dispositif pour l'étude des propriétés des solénoïdes.

spires rapprochées et parallèles et repliant les deux extrémités du fil suivant deux directions rectilignes perpendiculaires aux plans des spires (fig. 416); chaque spire de l'hélice peut, en effet, être décomposée en deux éléments qui sont les projections de cette spire sur deux plans rectangulaires, l'un parallèle et l'autre perpendiculaire à l'axe. Un de ces éléments sera donc rectiligne et aura une direction parallèle à l'axe, l'autre sera circulaire et son plan sera perpendicu-

laire à l'axe. En vertu de la loi des courants sinueux, chaque spire produit le même effet que ces deux éléments, si l'on considère cet effet à une distance notablement supérieure au pas de l'hélice et au rayon du cylindre sur lequel on peut supposer que l'hélice est enroulée. Mais l'action des divers éléments rectilignes est détruite par celle des deux fils rectilignes de retour, car le courant circule en sens inverse dans ces fils et dans ces éléments, et l'action du solénoïde, construit comme nous venons de le dire, se réduit en conséquence à celle des éléments circulaires, c'est-à-dire

à celle d'un solénoïde satisfaisant à la définition théorique énoncée plus haut.

En faisant aboutir les deux extrémités des fils de retour aux deux bornes B et C de l'appareil de la figure 443, on peut rendre le solénoïde mobile autour d'un axe vertical. On peut également réaliser la même mobilité en adoptant la disposition représentée sur la figure 446; les deux brins du fil de retour, coudés plusieurs fois à angle droit, sont terminés par deux pointes K, K' qui reposent sur le fond de petits godets pleins de mercure, portés eux-mêmes par des tiges métalliques F, F' coudées à angle droit; le courant, fourni par une pile, aboutit alors aux deux bornes P et N qui sont réunies aux deux tiges F et F'.

a. — Un solénoïde mobile autour d'un axe vertical s'oriente sous l'action du champ magnétique terrestre quand il est traversé par un courant; chacun des courants circulaires du solénoïde prend, comme dans l'expérience du paragraphe 682, une position d'équilibre telle que sa face positive soit tournée vers le nord, sa face négative vers le sud. L'axe du solénoïde se place ainsi dans le méridien magnétique du lieu où se fait l'expérience et l'extrémité du solénoïde tournée vers le nord est toujours telle que, pour un observateur placé en face, le courant y circule dans le sens inverse du mouvement des aiguilles d'une montre. On a dès lors donné le nom de *pôle nord* à cette extrémité, et celui de *pôle sud* à l'extrémité tournée vers le sud; un observateur qui regarderait le solénoïde par cette extrémité y verrait le courant circuler dans le sens des aiguilles d'une montre.

Si, au lieu d'être seulement mobile autour d'un axe vertical, le solénoïde était mobile dans toutes les directions, son axe se placerait, sous l'action du champ magnétique terrestre, parallèlement à l'axe magnétique d'une aiguille aimantée suspendue par son centre de gravité et placée dans le même lieu, c'est-à-dire suivant la direction des lignes de force du champ terrestre.

b. — Lorsqu'au dessous du solénoïde de la figure 446 orienté sous l'action de la terre, on place, parallèlement à l'axe, un conducteur rectiligne traversé par un courant, on voit le solénoïde dévier de sa position d'équilibre; en effet la partie inférieure de chaque spire, qui est la partie la plus voisine du conducteur, doit tendre, d'après la loi des courants non parallèles, à se placer de telle sorte que le courant qui la traverse soit parallèle au courant qui parcourt le conducteur, et de même sens que ce courant. L'axe du solénoïde

tend donc à se mettre en croix avec le conducteur, le pôle nord étant dévié à la gauche du courant fixe. L'angle de déviation est, toutes choses égales d'ailleurs, d'autant plus voisin de 90° que l'intensité du courant qui traverse le conducteur fixe est elle-même plus grande.

c. — Lorsqu'on approche un solénoïde, dont on a préalablement déterminé les pôles, d'un second solénoïde mobile, on constate que, comme pour des aimants, *les pôles de noms contraires s'attirent, tandis que les pôles de même nom se repoussent.*

d. — Si l'on approche de même un aimant, tenu à la main, d'un solénoïde mobile, ou réciproquement, l'expérience montre encore que *les pôles de noms contraires s'attirent et que les pôles de même nom se repoussent.*

686. **Théorie du magnétisme d'Ampère.** — Les analogies qui existent entre les solénoïdes et les aimants, analogies qui résultent des faits signalés dans le paragraphe précédent, conduisent à assimiler, comme l'a fait Ampère, les aimants aux solénoïdes.

Dans cette hypothèse, chaque molécule d'un corps susceptible d'aimantation serait parcourue par un courant fermé, *courant particulière*, analogue à l'un des courants circulaires qui constituent un solénoïde. Dans un corps non aimanté, les courants particuliers existeraient, mais seraient orientés d'une façon quelconque les uns par rapport aux autres, de telle sorte qu'aucun effet résultant appréciable ne se manifesterait. Après l'aimantation au contraire, les courants particuliers seraient orientés parallèlement les uns aux autres, de manière à constituer, à l'intérieur du corps, un certain nombre de solénoïdes à axes parallèles ou sensiblement parallèles.

L'aimantation consisterait donc simplement en une orientation de courants particuliers préexistant. Dans certains corps, tels que le fer doux, cette orientation cesserait d'exister dès que la force qui l'a produite cesse d'agir; dans d'autres, au contraire, l'acier par exemple, l'orientation continuerait à subsister alors que la cause à laquelle elle est due a cessé d'exercer son action.

L'hypothèse des courants particuliers rend du reste facilement compte des phénomènes observés après la rupture des aimants, phénomènes dont il a été parlé plus haut.

687. **Aimantation par les courants.** — La possibilité d'aimanter un corps par l'action d'un courant constitue une remarquable confirmation expérimentale de la théorie d'Ampère.

Un barreau de fer ou d'acier, placé en croix avec un conducteur traversé par un courant, s'aimante d'une façon temporaire ou permanente et présente toujours son pôle nord à la gauche du courant. On augmente d'ailleurs l'action du courant en l'enroulant en hélice autour du barreau (fig. 417, *a*), les actions des diverses parties

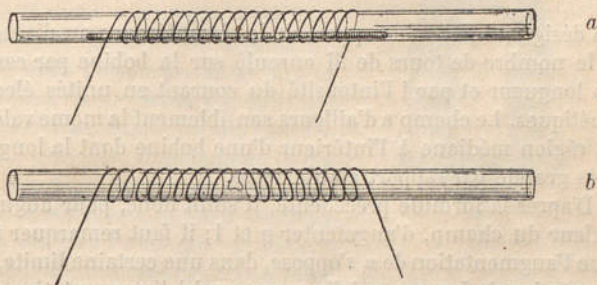


Fig. 417. — Aimantation par les courants.

du fil étant alors concordantes. Le sens de l'aimantation dépend du sens dans lequel le courant tourne autour du barreau; il se forme toujours un pôle nord à l'extrémité de l'hélice dans laquelle le courant circule en sens inverse du mouvement des aiguilles d'une montre pour un observateur placé en face, et ce fait s'explique par l'action qu'exerce le courant enroulé sur les courants particuliers du barreau.

Si, au lieu d'enrouler le fil régulièrement, on change le sens d'enroulement en repliant le fil sur lui-même comme le montre la figure 417 *b*, on développe sur le barreau un *point consécut* (§ 669); au niveau de ce point, en effet, le changement du sens de l'enroulement et par suite du sens du courant, détermine une orientation inverse des courants particuliers.

688. Applications. Aimants artificiels. Electro-aimants. Trembleurs. Télégraphes, etc. — *Aimants artificiels.* — L'aimantation par les courants est utilisée pour obtenir de puissants aimants artificiels. On communique à un barreau d'acier le maximum de magnétisme permanent qu'il est susceptible de prendre en le plaçant pendant quelques instants dans le champ magnétique très intense qui existe à l'intérieur d'une longue bobine cylindrique ⁽¹⁾ formée des spires contigues d'un fil isolé traversé par un courant.

(1) On peut également promener une courte bobine, traversée par un courant, à plusieurs reprises d'un bout à l'autre du barreau, en com-

Dans l'intérieur d'une bobine cylindrique de longueur infinie, le champ magnétique est uniforme, les lignes de force sont parallèles à l'axe de la bobine et l'intensité du champ en chaque point est donnée par la formule :

$$\varphi = 4\pi n I,$$

en désignant par π le rapport de la circonférence au diamètre, par n le nombre de tours de fil enroulé sur la bobine par centimètre de longueur et par I l'intensité du courant en unités électro-magnétiques. Le champ a d'ailleurs sensiblement la même valeur dans la région médiane à l'intérieur d'une bobine dont la longueur est très grande par rapport au diamètre.

D'après la formule précédente, il suffit donc, pour augmenter la valeur du champ, d'augmenter n et I ; il faut remarquer toutefois que l'augmentation de n s'oppose, dans une certaine limite, à l'augmentation de I , parce qu'elle correspond à l'augmentation de résistance du circuit et parce qu'un fil trop fin subit, par le passage du courant, un échauffement qui peut amener la destruction de la substance isolante qui l'entoure et qui sert à séparer les spires consécutives.

Pour une même valeur de n et de I , on peut encore augmenter la valeur du champ en enroulant plusieurs couches de fil sur la bobine; mais en augmentant ainsi la longueur du fil traversé par le courant, on augmente encore la résistance du circuit et l'on diminue par suite l'intensité du courant pour une même valeur de la force électromotrice disponible. Il y a donc, de ce fait, une limite au nombre de couches qu'il est avantageux d'enrouler sur la bobine.

Électro-aimant. — L'ensemble constitué par une bobine et un barreau de fer doux qui en occupe l'axe constitue l'appareil connu sous le nom d'*électro-aimant*.

On donne souvent aux électro-aimants la forme représentée sur la figure 418; le barreau de fer est recourbé en fer à cheval et ses parties rectilignes sont entourées par deux bobines sur lesquelles s'enroule un même fil; l'enroulement du fil doit être tel qu'en supposant le barreau redressé et les bobines accolées par leur face supérieure, l'hélice de l'une soit la continuation de celle de l'autre.

Les électro-aimants permettent d'obtenir des champs magnétiques par le milieu et terminant de même après avoir passé un même nombre de fois sur chaque moitié.

ques plus intenses que les aimants permanents les plus puissants, et présentent l'avantage de n'agir que quand on actionne la bobine.

Le magnétisme du fer doux ne disparaît pas dès qu'on interrompt le courant, car si l'on munit l'électro-aimant d'une armature, celle-ci reste maintenue avec force contre les pôles par suite du magnétisme rémanent; mais l'armature n'est plus attirée, si, après l'avoir arrachée, on la présente de nouveau aux pôles de l'électro-aimant. On diminue notablement le magnétisme rémanent en interposant, entre l'armature et les pôles, une feuille de papier ou de carton; l'armature se détache alors par son propre poids dès qu'on interrompt le courant.

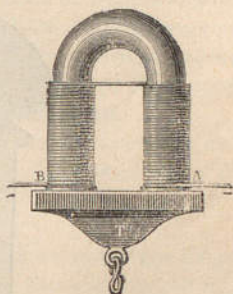


Fig. 418. — Electro-aimant.

Trembleurs. — Les applications des électro-aimants sont des plus nombreuses; on les emploie en Médecine pour extraire du sein des tissus des fragments de fer ou d'acier qui y ont pénétré; ils entrent, d'autre part, dans la construction d'un grand nombre d'instruments utilisés en Physique, en Physiologie et dans diverses branches de l'industrie. Nous avons déjà indiqué (§ 364) le diapason chronographe, nous nous bornerons à décrire ici les *trembleurs* et à exposer le principe des *télégraphes*.

Le *trembleur électrique* le plus couramment employé consiste en un électro-aimant en fer à cheval EE (fig. 419) dont l'armature A est portée par un ressort qui tend à l'écarter des pôles de l'électro-aimant et à la maintenir appliquée contre un buttoir métallique; ce buttoir peut d'ailleurs être constitué, soit par un second ressort R, soit par la pointe d'une vis fixée à l'extrémité d'une colonne métallique. L'une des extrémités DC du fil de l'électro-aimant communique directement avec l'un des pôles d'une pile, tandis que l'autre extrémité M est en relation avec l'armature A; un fil parti du buttoir R aboutit à la borne Z où l'on fixe le second pôle de la pile, si bien que le courant, qui entre par C par exemple, parcourt le fil de l'électro-aimant, puis arrive en M, parcourt l'armature R, passe au buttoir qu'elle touche et sort par Z. Le noyau de l'électro-aimant s'aimante donc sous l'action du courant qui traverse les bobines EE, et attire l'armature A qui abandonne le buttoir R; le circuit est dès lors rompu, le courant cesse, l'électro-

aimant devient inactif, et l'armature A, grâce à l'élasticité du ressort qui la porte, revient en contact avec le buttoir R, d'où nou-

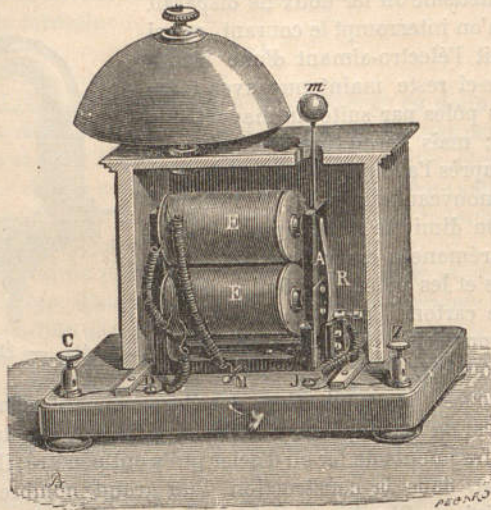


Fig. 419. — Sonnerie électrique.

veau passage du courant, nouvelle attraction de A et ainsi de suite.

En plaçant à l'extrémité de l'armature A un petit marteau *m* et en disposant un timbre en face de ce marteau, on réalise une *sonnerie électrique* (fig. 419).

Télégraphes. — Les *télégraphes* sont des appareils qui permettent de transmettre à distance des signaux conventionnels ou des caractères écrits. La plupart des *télégraphes électriques* sont basés sur l'emploi des électro-aimants; les modèles en sont fort nombreux, nous n'en donnerons ici que le principe.

Un électro-aimant, muni d'une armature maintenue à une faible distance du fer doux par un ressort antagoniste, se trouve dans l'une des stations A, tandis qu'une pile et un interrupteur sont placés à l'autre station B; le courant de la pile, après avoir traversé l'interrupteur, est envoyé dans les bobines de l'électro-aimant par un *fil de ligne* qui relie les deux stations, puis ramené à la pile par un second fil, que l'on peut d'ailleurs supprimer en mettant en communication avec le sol l'un des pôles de la pile et l'une des

extrémités du fil de l'électro-aimant ; c'est alors la terre qui constitue le fil de retour.

Grâce à cette disposition, l'armature de l'électro-aimant est attirée et s'approche de l'électro-aimant dans la station A, chaque fois que, dans la station B, on ferme le circuit à l'aide de l'interrupteur ; par contre, l'électro-aimant devient inactif et l'armature s'écarte sous l'action du ressort antagoniste, chaque fois que l'interrupteur est manœuvré de façon que le circuit soit interrompu.

Le manœuvrement de l'interrupteur permet donc d'imprimer de la station B des mouvements de va-et-vient à l'armature de la station A et de régler à volonté, de la station B, le nombre et la durée de ces mouvements.

Les déplacements de l'armature A peuvent, comme dans l'appareil de Morse, être inscrits sur un cylindre enregistreur, et il est alors facile, en représentant conventionnellement les diverses lettres de l'alphabet par des combinaisons convenables du nombre et de la durée des signaux, de transmettre des mots de l'une des stations à l'autre.

L'interrupteur peut être remplacé par des *manipulateurs* plus complexes, tels que celui de l'appareil de Hughes, dans lequel on établit le courant en appuyant sur des touches qui portent les diverses lettres de l'alphabet. Les déplacements de l'armature de l'électro-aimant *récepteur*, au lieu d'être directement enregistrés, servent alors simplement à déclancher un mouvement d'horlogerie convenablement réglé qui, grâce à un dispositif sur lequel nous ne saurions insister ici, imprime sur une bande de papier la lettre sur laquelle on a appuyé pour établir le courant.

CHAPITRE IX

INDUCTION

689. *Définition des courants d'induction.* — La découverte de l'importante catégorie de phénomènes à laquelle on a donné le nom de *courants d'induction* est due à Faraday qui constata, en 1831, qu'un circuit homogène fermé, ne contenant aucune force électromotrice capable de donner naissance à un courant électrique, est en général parcouru par un courant, si l'on déplace ce circuit dans un champ magnétique, ou si, laissant ce circuit fixe, on fait varier les divers éléments du champ magnétique dans lequel il est placé.

Ce champ magnétique peut d'ailleurs être dû à un courant, à un aimant ou à la terre.

Les courants ainsi développés ont reçu le nom de *courants induits* ou de *courants d'induction*. On appelle *induit* le circuit dans lequel ces courants se produisent et *inducteur* l'aimant ou le courant qui leur donne naissance.

690. **Induction par les courants et par les aimants.** — Considérons deux circuits fermés, parallèles dans une partie de leur étendue, dont l'un comprend simplement un fil métallique et un galvanomètre destiné à accuser, par la déviation de son aiguille, le passage d'un courant dans ce circuit et à indiquer le sens de ce courant, tandis que l'autre est constitué par un fil métallique, une pile, un interrupteur et une boîte de résistance qui permet, comme nous le verrons plus loin, de faire varier l'intensité du courant qui traverse ce circuit. Le premier circuit constituera le circuit induit, le second, le circuit inducteur.

L'expérience montre que l'aiguille du galvanomètre reste immobile tant que les deux circuits conservent leurs positions respectives et que le circuit inducteur est parcouru par un courant constant. Mais il n'en est plus ainsi si l'un des circuits se déplace, ou si le courant qui parcourt le circuit inducteur augmente ou diminue d'intensité, s'établit ou s'interrompt; dans chacun de ces cas, le circuit induit est parcouru par un courant, qui cesse d'ailleurs en même temps que la cause (variation d'intensité ou de distance, etc.) qui lui a donné naissance.

On dit que le sens du courant dans le circuit induit est *direct* ou *inverse* suivant que, dans les deux parties parallèles du circuit inducteur et du circuit induit, le courant induit est de même sens que le courant inducteur ou de sens inverse par rapport à ce courant. Le sens du courant induit par rapport à celui du courant inducteur est alors donné par les règles suivantes :

Le courant induit est *inverse* lorsque le courant inducteur *s'approche* du circuit induit ou réciproquement, lorsque le courant inducteur *augmente* d'intensité, ou encore lorsque ce courant *commence*;

Le courant induit est *direct* lorsque le courant inducteur *s'éloigne* du circuit induit ou réciproquement, lorsque le courant inducteur *diminue* d'intensité, ou encore lorsque ce courant *cesse*.

Les effets observés sont d'ailleurs d'autant plus intenses que les deux circuits sont plus rapprochés et que le parallélisme de ces

circuits existe sur une longueur plus grande; aussi remplace-t-on généralement les deux parties rectilignes parallèles par deux bobines qui peuvent pénétrer l'une dans l'autre, comme le montre la

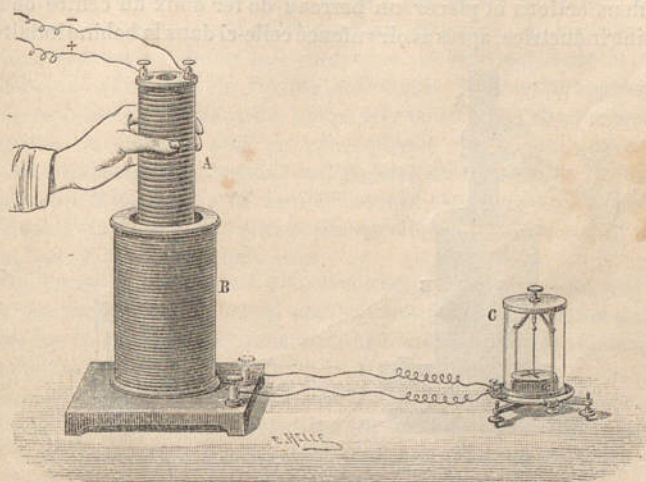


Fig. 420. — Induction par les courants.

fig. 420. La bobine inductrice A est reliée à une pile qui n'est pas représentée sur la figure, et la bobine induite B est réunie au galvanomètre C.

On obtient des effets identiques à ceux dont nous venons de parler en remplaçant la bobine inductrice par un barreau d'acier aimanté A (fig. 421) ou par un barreau de fer doux que l'on place à l'intérieur de la bobine induite et dont on approche ou on éloigne un aimant permanent. Le sens du courant induit est encore donné par les règles précédentes, à condition de substituer par la pensée au barreau d'acier ou de fer aimanté un solénoïde qui aurait les pôles orientés comme ceux du barreau.

Par suite, le courant induit est *inverse* par rapport au courant de ce solénoïde, lorsque l'aimant *s'approche*, lorsque l'aimantation du fer doux *commence*, ou lorsque cette aimantation *augmente* d'intensité sous l'influence de l'aimant qui se rapproche. Ce même courant induit est *direct* dans le cas où l'aimant *s'éloigne* et dans le cas où l'aimantation du fer doux *diminue* ou *cesse*.

Les courants induits obtenus avec des aimants sont en général plus intenses que ceux produits par les courants ; on peut d'ailleurs, pour augmenter encore l'intensité des effets observés, combiner les deux actions et placer un barreau de fer doux au centre de la bobine inductrice, après avoir enfoncé celle-ci dans la bobine induite.

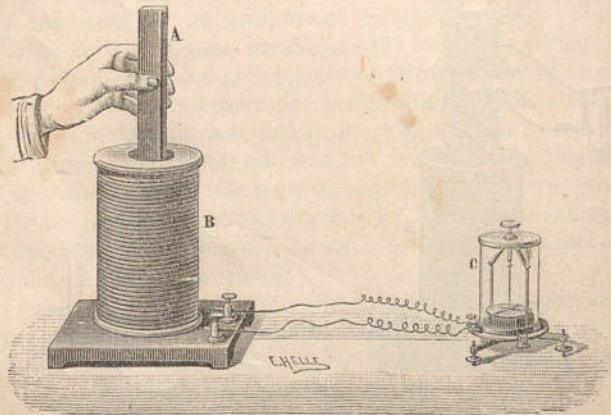


Fig. 421. — Induction par les aimants.

L'établissement du courant dans la bobine inductrice produit alors l'aimantation du barreau de fer doux avec formation d'un pôle nord à l'extrémité de l'hélice en face de laquelle il faut se placer pour voir le courant circuler en sens inverse du mouvement des aiguilles d'une montre ; le sens des courants particuliers du fer doux est donc le même que celui du courant qui parcourt la bobine inductrice, et les effets, sur la bobine induite, du courant qui commence dans la bobine inductrice et de l'aimantation qui prend en même temps naissance dans le fer doux, sont par suite concordants ; il en est de même des effets dus à l'interruption du courant inducteur et à la disparition de l'aimantation du fer doux.

691. **Induction par la terre.** — On peut observer également la production de courants induits dans un circuit fermé qui se déplace dans le champ magnétique terrestre. Il suffit, par exemple, pour mettre ces courants en évidence, de prendre un circuit enroulé sur un cadre, mobile autour d'un axe vertical, et relié aux bornes d'un galvanomètre. L'aiguille du galvanomètre dévie lorsqu'on

fait effectuer au cadre une rotation de 180° autour de son axe.

692. **Induction d'un courant sur son propre circuit ou self-induction.** — Un courant ne s'établit pas instantanément dans l'étendue du circuit qu'il doit traverser. Par suite, au moment de la fermeture d'un circuit qui comprend un électromoteur et une bobine, et avant que le régime soit établi, l'intensité augmente progressivement pendant un temps très court dans chaque spire ; chacune de celles-ci doit en conséquence développer, dans les spires voisines, un courant induit inverse du courant de l'électromoteur. L'intensité de ce dernier courant est donc, pendant cette période d'établissement, plus petite qu'elle ne serait si aucun courant induit ne prenait naissance.

On donne le nom de *self-induction* à cette induction d'un courant sur son propre circuit, et le courant induit qui prend naissance dans les conditions que nous venons d'indiquer est appelé *extra-courant de fermeture*.

Un phénomène analogue de self-induction se produit à l'ouverture du circuit ; mais le courant induit, ou *extra-courant de rupture*, qui prend alors naissance, est direct ; ce courant s'ajoute donc au courant inducteur, dont l'intensité est ainsi renforcée.

C'est par suite de cette concordance de direction du courant primitif et de l'extra-courant de rupture que, lorsqu'on ouvre et ferme alternativement un circuit, on observe une étincelle à l'ouverture

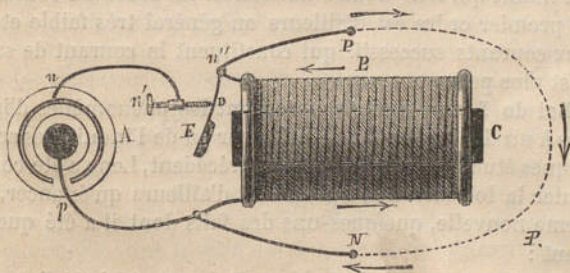


Fig. 422. — Dispositif permettant de recueillir l'extra-courant de rupture.

seulement ou tout au moins une étincelle plus forte à l'ouverture qu'à la fermeture.

Les effets de la self-induction se font également sentir sur une partie rectiligne de circuit mais ils sont alors très faibles ; ces

mêmes effets sont au contraire d'autant plus marqués que le fil du circuit est enroulé en spires plus nombreuses et plus serrées et l'on peut encore les accroître en plaçant un barreau de fer doux au centre de ces spires.

Faraday a démontré expérimentalement l'existence des deux extra-courants.

La figure 422 représente la disposition grâce à laquelle on peut recueillir l'extra-courant de rupture. Le circuit de la pile A est fermé grâce au contact d'une vis *n'* avec un ressort D qui porte à son extrémité une masse de fer doux E; en outre, la bobine B est munie d'une masse de fer doux C. Lorsque le courant de la pile passe dans la bobine B, le fer doux C s'aimante et attire la masse E, ce qui rompt le circuit en D; mais le circuit dérivé *n'*PN, dont fait partie la bobine B, reste fermé et l'extra-courant de rupture le traverse.

693. **Courants induits de différents ordres.** — Les courants produits par induction dans un circuit fermé peuvent à leur tour donner naissance à des courants induits dans des circuits voisins. Ces courants induits sont alors dits de *second ordre*, tandis qu'on appelle de *premier ordre* ceux qui sont dus à l'action inductrice d'un courant fourni par un électromoteur, d'un aimant ou de la terre. Il existe de même des courants de troisième, de quatrième ordre, etc.

Les courants de second ordre, se composent de deux courants successifs et inverses dus à l'établissement et à la disparition du courant induit qui leur donne naissance. La durée du courant induit de premier ordre est d'ailleurs en général très faible et celle des deux courants successifs qui constituent le courant de second ordre est plus petite encore.

694. **Loi de Lenz.** — En rapprochant les phénomènes d'induction, dus à un déplacement de l'inducteur ou de l'induit, des actions mécaniques étudiées dans le Chapitre précédent, Lenz a été conduit à formuler la loi suivante, qui ne fait d'ailleurs qu'énoncer, sous une forme nouvelle, quelques-uns des faits dont il a été question plus haut :

Le sens de tout courant induit, dû au déplacement relatif d'un circuit fermé par rapport à un inducteur, est tel que, par son action sur l'inducteur, le courant induit tend à s'opposer au déplacement qui lui a donné naissance.

Si, par exemple, on approche l'inducteur de l'induit, le sens du courant qui se développera dans l'induit devra avoir pour effet de

s'opposer au déplacement de l'inducteur; ce sens devra donc, en vertu des lois du paragraphe 684, être inverse de celui du courant inducteur, ce qui est en effet.

Il résulte de là que, pour produire un courant induit par déplacement relatif, il faut effectuer un travail dynamique qui n'existerait pas si le courant induit n'était pas engendré; par suite, l'énergie créée, et consistant en un courant induit, représente l'équivalent du travail dynamique dépensé.

695. Force électromotrice et intensité des courants induits. — L'expérience a montré que les courants induits suivent la loi de Ohm et qu'ils peuvent être considérés comme dus à une force électromotrice qui a reçu le nom de *force électromotrice d'induction*; ces courants présentent les mêmes caractères généraux que les courants des piles, mais ils en diffèrent par leur mode de production, par leur faible durée et par la valeur variable que présente, à chaque instant, la quantité d'électricité qu'ils mettent en jeu. L'intensité d'un courant induit, à un moment déterminé, n'est en effet, donnée par le rapport $\frac{q}{t}$ de la quantité d'électricité qui traverse une section quelconque du circuit pendant le temps t à ce même temps t , qu'à condition de considérer un temps t infiniment petit; lorsque t a une durée finie, le rapport $\frac{q}{t}$ ne fait connaître que la valeur de l'*intensité moyenne* du courant pendant le temps considéré.

696. Lois générales des courants induits. — De la comparaison des conditions dans lesquelles se produisent les courants d'induction avec le nombre et la direction des lignes de force du champ magnétique dans lequel se trouve le circuit induit, on conclut qu'un courant d'induction se développe toutes les fois que, par un moyen quelconque, on fait varier le nombre n des lignes de force qui passent à l'intérieur du contour fermé constitué par le circuit induit. Le sens du courant induit est d'ailleurs tel que sa face positive est tournée vers le côté d'où partent les lignes de force si n augmente, vers le côté où aboutissent les lignes de force si n diminue.

L'expérience a permis d'établir les lois suivantes :

1^o *Quelle que soit la façon dont on fait varier le nombre n des lignes de force qui traversent un circuit, deux variations de n lignes égales et inverses entre elles développent toujours, dans le circuit, des quantités égales d'électricité qui circulent en sens contraires.*

D'après cela, les quantités d'électricité des courants induits de sens contraires dus à la fermeture et à l'ouverture d'un même courant inducteur, ou à deux déplacements inverses d'un même courant ou d'un même aimant, sont égales entre elles.

2° *La durée d'un courant induit est égale à celle de la variation qui le produit.*

3° *La quantité d'électricité induite ne dépend que de la grandeur de la variation qui l'engendre; elle est indépendante de la durée et par conséquent de la vitesse de cette variation.*

Si l'on approche, par exemple, ou si l'on éloigne l'inducteur de l'induit, la quantité d'électricité induite ne dépend, ni du chemin parcouru par l'inducteur, ni de la vitesse avec laquelle il se déplace, mais seulement de son intensité et de ses positions extrêmes. Toutes choses égales d'ailleurs, la quantité d'électricité induite est proportionnelle à l'intensité de l'inducteur.

4° La quantité d'électricité induite Q étant indépendante de la durée t de la variation qui l'engendre et la durée du courant induit étant égale à celle de cette variation, il en résulte que :

L'intensité moyenne $I = \frac{Q}{t}$ du courant induit développé par une variation déterminée, est inversement proportionnelle à la durée t de la variation.

5° Il résulte immédiatement de ce qui précède que :

La force électromotrice qui donnerait un courant d'intensité moyenne égale à celle du courant induit est d'autant plus grande que la variation qui produit le courant est elle-même plus grande et plus rapide.

On obtient, d'autre part, une force électromotrice considérable en enroulant, comme nous l'avons déjà dit, le fil induit sur une bobine dans l'axe de laquelle on place l'inducteur; cela revient, en effet, à associer en série un grand nombre de circuits, chaque spire de la bobine induite pouvant être considérée comme un circuit relié par ses deux extrémités aux deux circuits voisins. La force électromotrice de la bobine induite peut ainsi être regardée à chaque instant comme la somme des forces électromotrices développées au même moment dans ses diverses spires. Cette force électromotrice totale sera, toutes choses égales d'ailleurs, d'autant plus grande que les spires seront plus nombreuses et que la variation du nombre des lignes de force qui rencontrent le plan de chaque spire à l'intérieur du contour formé par celle-ci sera plus grande et plus rapide.

Il y aura à ce point de vue avantage à prendre un fil induit très fin, afin qu'on puisse l'enrouler en un grand nombre de spires et que chacune de celles-ci soit aussi rapprochée que possible de l'inducteur. Quand à l'inducteur, il y aura avantage, s'il est constitué par un courant, à ce que le fil dans lequel ce courant circule soit peu résistant, et par suite gros et court; enfin la variation du champ produite par l'inducteur devant être très rapide, il faudra, dans le cas où cette variation sera engendrée par un déplacement de l'inducteur ou de l'induit, que la vitesse de ce déplacement soit très grande, et, lorsque la variation sera due à la fermeture ou à la rupture d'un courant, que cette fermeture ou cette rupture soient aussi brusques que possible.

Il importe de remarquer que, dans le cas où la variation du champ est due à la fermeture et à la rupture d'un courant inducteur, la force électromotrice et l'intensité moyenne du courant induit de rupture sont plus grandes que celles du courant induit de fermeture, car la variation de champ due à la fermeture du courant inducteur est toujours, à cause de la self-induction (§ 692), moins rapide que la variation due à la rupture du même courant. L'extra-courant de fermeture, qui est inverse, met en effet obstacle à l'établissement du courant inducteur, dont l'intensité ne peut donc croître que lentement, et prolonge ainsi la période pendant laquelle se produit le courant induit de fermeture qui est *inverse*. L'extra-courant de rupture qui est direct augmente sans doute, pendant un temps très court, l'intensité du courant inducteur, ce qui donne naissance dans le fil induit à un courant *inverse* de très courte durée; mais, en revanche, l'intensité du courant inducteur revient très rapidement à zéro en partant d'une valeur plus élevée que si l'extra-courant n'avait pas existé, d'où production d'un courant induit *direct* de force électromotrice et d'intensité moyennes plus grandes que celles du courant induit de fermeture. Lorsque les interruptions sont suffisamment rapides, le courant inducteur ne peut atteindre son intensité normale, et le courant inverse, qui se développe dans le circuit induit au commencement de la rupture, se confond avec celui qui est dû à la fermeture du courant inducteur. On n'observe plus alors que deux courants induits l'un inverse, l'autre, direct, de durée beaucoup plus courte et d'intensité moyenne bien plus grande.

697. Courants alternatifs et courants redressés. — Nous venons de voir que le circuit induit était alternativement parcouru par des

courants de sens inverses lorsque l'inducteur était constitué par un courant alternativement établi et interrompu; il en est de même encore lorsque les courants induits sont engendrés par un déplacement continu et que le mobile, induit ou inducteur, repasse par la même position après un temps t . Après ce temps t , en effet, le nombre des lignes de force qui traversent le circuit induit sera le même qu'au début; or, puisque ce nombre a varié dans l'intervalle, il est nécessaire qu'il ait augmenté d'abord et diminué ensuite ou réciproquement. Par conséquent, le courant, induit pendant l'intervalle de temps t , aura parcouru le circuit fermé, d'abord dans un certain sens, puis en sens inverse. Si le mouvement de la partie mobile se reproduit un certain nombre de fois, le circuit induit sera parcouru par des courants dont le sens changera 2 fois pendant chaque révolution de la partie mobile.

Ces courants, qui parcourent ainsi le circuit induit alternativement dans un sens et dans un autre, sont dits *alternatifs*. On conçoit d'ailleurs qu'il soit possible, grâce à l'emploi d'un commutateur convenable, de *redresser* ces courants, c'est-à-dire de les faire circuler toujours dans le même sens le long d'une partie du circuit induit qui n'est point soumise à l'induction; il suffit pour cela que le commutateur, mobile lui-même, change le sens dans lequel le courant induit est lancé le long de cette partie du circuit, chaque fois que le sens de ce courant change dans l'autre partie sous l'influence de l'inducteur.

L'intensité des courants alternatifs, s'annule périodiquement et passe périodiquement aussi par un maximum; dans le cas général, cette intensité sera continuellement variable et ses valeurs successives pourront être représentées par une courbe analogue à la courbe I de la figure 423, les ordonnées positives et négatives (au-dessus et au-dessous de l'axe horizontal des temps) correspondant aux deux sens successifs du courant.

Lorsque la courbe représentative des intensités successives d'un courant alternatif a la forme d'une sinusoïde, le courant est dit *sinusoïdal*.

Si les courants sont redressés à l'extérieur de la bobine induite, les ordonnées seront toutes d'un même côté de l'axe des temps, mais l'intensité continuera à être périodiquement variable, conformément aux variations des ordonnées de la courbe II de la figure 423.

On peut toutefois obtenir un courant sensiblement constant dans

une portion de circuit en y faisant superposer plusieurs courants induits redressés qui s'annulent chacun à des instants différents. La figure 423 représente en III les intensités de deux courants in-

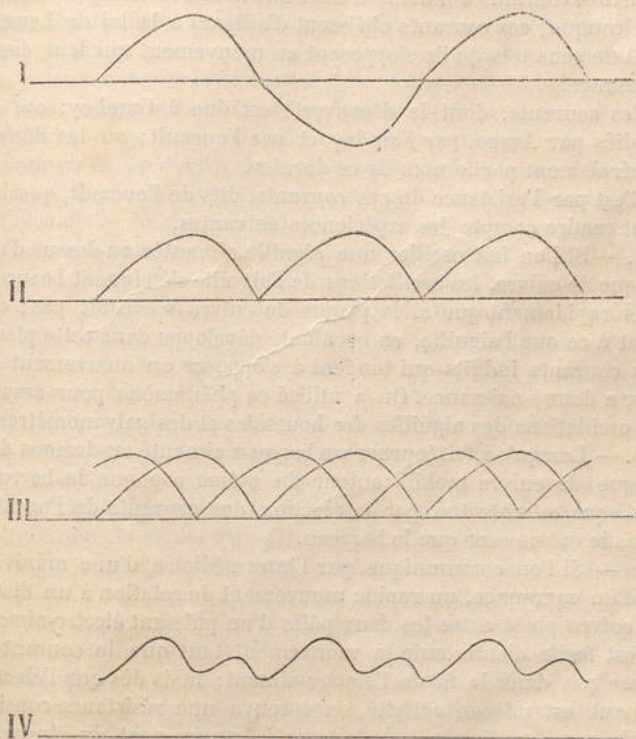


Fig. 423. — Formes diverses de courants induits.

duits redressés tels que l'intensité de l'un est nulle au moment où celle de l'autre est maxima. La même figure représente en IV l'intensité du courant résultant de la superposition des deux courants précédents ; cette intensité n'est pas constante, mais elle n'est jamais nulle, et l'on conçoit que, par la superposition d'un plus grand nombre de courants induits s'annulant à des instants différents, on puisse obtenir un courant résultant sensiblement constant.

698. **Induction dans la masse d'un conducteur non linéaire. Courants de Foucault.** — Toute variation de champ, et par suite tout déplacement entraînant une telle variation, déterminent également des courants d'induction dans une masse métallique de forme quelconque ; ces courants obéissent d'ailleurs à la loi de Lenz, et sont de sens tels qu'ils s'opposent au mouvement qui leur donne naissance.

Ces courants, dont la découverte est due à Gambey, ont été étudiés par Arago, par Faraday et par Foucault ; on les désigne généralement par le nom de ce dernier.

C'est par l'existence de ces courants, dits de Foucault, que l'on peut rendre compte des expériences suivantes.

a. — Si l'on fait osciller une aiguille aimantée au-dessus d'une plaque de cuivre, les oscillations de l'aiguille s'éteignent beaucoup plus rapidement que si la plaque de cuivre n'existait pas ; cela tient à ce que l'aiguille, en oscillant, développe dans cette plaque des courants induits qui tendent à s'opposer au mouvement qui leur a donné naissance. On a utilisé ce phénomène pour amortir les oscillations des aiguilles des boussoles et des galvanomètres.

b. — Lorsqu'on fait tourner un barreau aimanté au-dessous d'un disque de cuivre mobile autour du même axe que le barreau, le disque est entraîné, par la réaction des courants de Foucault, dans le même sens que le barreau.

c. — Si l'on communique, par l'intermédiaire d'une manivelle et d'un engrenage, un rapide mouvement de rotation à un disque de cuivre placé entre les deux pôles d'un puissant électro-aimant, il est facile d'entretenir le mouvement tant que le courant ne passe pas dans le fil de l'électro-aimant ; mais dès que l'électro-aimant est mis en activité, on éprouve une résistance considérable pour continuer à entretenir le mouvement du disque, et celui-ci atteint alors une température très élevée.

Les courants de Foucault peuvent se produire également dans la masse de fer doux qui constitue le noyau des électro-aimants ; l'échauffement et la perte de travail qui en sont la conséquence peuvent être considérables, lorsque le fil est parcouru par un courant fréquemment interrompu ou par des courants alternatifs. On obvie à cet inconvénient en formant le noyau des électro-aimants de fils de fer ou de lames minces isolées qui sont placées perpendiculairement au plan des spires du fil.

699. **Machines d'induction.** — On appelle ainsi les appareils qui

permettent d'obtenir des courants d'induction par déplacement relatif de l'inducteur et de l'induit. Les machines d'induction sont d'un usage journalier dans les laboratoires et dans l'industrie, et plusieurs d'entre elles sont couramment employées en Électrothérapie. Ces machines d'induction sont dites *magnéto-électriques* lorsque l'inducteur est constitué par des aimants permanents ou par des électro-aimants excités au moyen d'une source indépendante de la machine; elles sont dites *dynamo-électriques*, ou par abréviation *dynamos*, lorsque l'inducteur est constitué par un électro-aimant excité au moyen du courant que produit la machine elle-même. Dans ce dernier cas, si le courant de la machine passe tout entier dans le fil qui entoure les électro-aimants, la dynamo est dite *en série*; mais on a construit des dynamos dans lesquelles le fil des électro-aimants est en dérivation sur le courant fourni par la machine, de façon qu'une partie seulement de ce courant actionne l'électro-aimant et la dynamo est alors dite en *dérivation* ou appelée *shunt-dynamo*. On peut encore enrouler deux fils sur les électro-aimants et faire passer par l'un la totalité du courant de la machine, par l'autre une dérivation de ce même courant, les dynamos ainsi construites sont appelées *dynamos compounds*.

Le principe des dynamos repose sur le magnétisme rémanent. Si le fer des électro-aimants inducteurs ne présentait pas trace de magnétisme, le déplacement relatif de l'induit ne pourrait produire un courant; mais, par suite de l'existence de traces de magnétisme rémanent, l'inducteur crée autour de lui un champ magnétique, très faible sans doute, mais pourtant suffisant pour donner naissance à un faible courant lors du déplacement relatif de l'induit par rapport à ce champ. Ce courant à son tour, en circulant dans le fil des électro-aimants, augmente leur magnétisme; le champ dû à ces électro-aimants devient dès lors plus intense, ce qui augmente l'intensité des courants développés dans l'induit, d'où résulte un accroissement de l'action de ces courants sur les électro-aimants, et ainsi de suite jusqu'à ce que le fer des électro-aimants possède l'aimantation maxima qu'il puisse acquérir.

Le champ magnétique terrestre peut aussi intervenir pour amorcer la machine.

Les machines magnéto et dynamo-électriques peuvent, suivant la façon dont elles sont construites, donner des courants continus, alternatifs ou redressés.

Nous nous bornerons à décrire sommairement ici les principales

machines d'induction, en particulier celles qui sont employées en Médecine, et à donner le principe de la *machine Gramme* qui est la plus ancienne et l'une des plus parfaites parmi les machines d'induction utilisées dans l'industrie.

700. **Machines de Clarke et de Pixii.** — Ces machines, aujourd'hui généralement abandonnées, ont servi de base à la plupart des machines d'induction longtemps utilisées pour les usages médi-

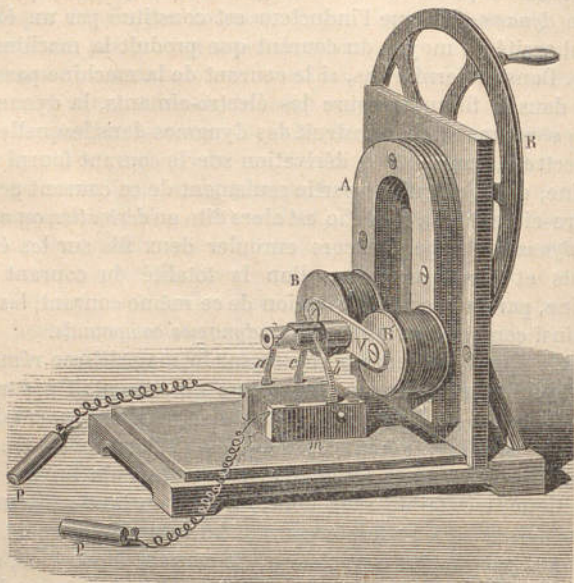


Fig. 424. — Machine de Clarke.

caux. C'est à ce titre surtout que nous croyons devoir en faire ici une étude rapide. La machine de Clarke est une magnéto constituée par un aimant fixe A (fig. 424) et un électro-aimant en fer à cheval BB', que l'on peut faire tourner, au moyen d'une roue R et d'une poulie, autour d'un axe horizontal passant entre les branches de l'aimant.

L'étude particulière de l'action de chaque pôle de l'aimant et du fer doux de l'électro-aimant sur chaque bobine montre que :

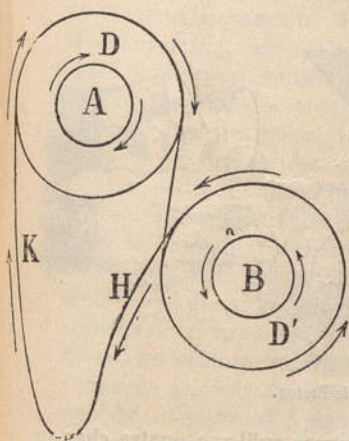
1° Pendant chaque demi-révolution, au-dessus ou au-dessous

de la droite qui réunit les pôles de l'aimant, chaque bobine est parcourue par un courant de sens invariable;

2° Le sens du courant change sur chaque bobine au moment où celle-ci franchit la ligne des pôles de l'aimant.

3° Les sens des courants sur les deux bobines sont à tout instant inverses l'un de l'autre; mais le sens de l'enroulement du fil étant inverse sur chaque bobine, les courants des deux bobines sont toujours de même sens, l'un par rapport à l'autre, dans le circuit

I



II

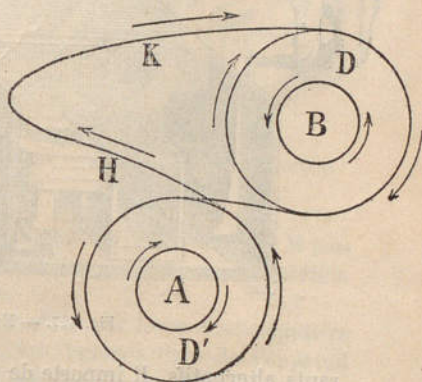


Fig. 425 et 426. — Enroulement du fil des bobines et sens du courant résultant dans la machine de Clarke (Drincourt, *Physique*).

extérieur (fig. 424 et 425). Le sens de ce courant résultant change d'ailleurs à chaque demi-révolution des bobines.

Le courant résultant, recueilli par les manettes *c* et *b* (fig. 424), est redressé grâce à une disposition spéciale du commutateur avec lequel *c* et *b* sont en contact; le circuit extérieur est donc toujours parcouru dans le même sens par le courant résultant. Il n'y a dès lors de variable, dans le circuit extérieur, que l'intensité du courant; cette intensité s'annule chaque fois que les bobines franchissent la ligne des pôles de l'aimant fixe.

Dans la machine de Pixii, les bobines sont fixes et l'aimant est animé d'un mouvement de rotation.

701. **Machines de Page et de Breton.** — Dans la machine de Page, une armature en fer doux tourne devant les pôles d'un aimant en fer à cheval et à une petite distance de ces pôles ; les branches de l'aimant sont entourées de bobines dans lesquelles circule le courant induit engendré par les modifications du champ magnétique qui sont la conséquence de la rotation du fer doux. Le circuit extérieur, réuni aux bobines, est parcouru par des cou-

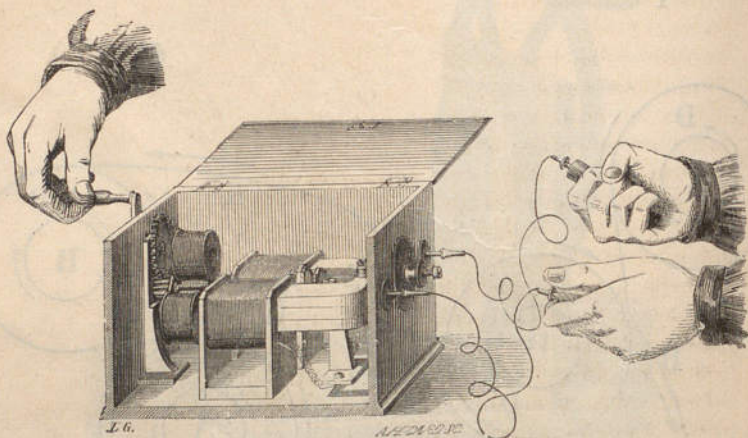


Fig. 427. — Machine de Breton.

rants alternatifs. Il importe de remarquer qu'il y a quatre changements de sens du courant extérieur pendant chaque révolution complète du fer doux.

La machine de Breton (fig. 427) est une combinaison des machines de Clarke et de Page. C'est en effet une machine de Clarke dont les branches de l'aimant sont entourées de bobines fixes ; une disposition spéciale permet de recueillir simultanément, dans le circuit extérieur, les courants des bobines mobiles et des bobines fixes. Comme le sens du premier de ces courants change deux fois et celui du second quatre fois pendant une révolution complète, un commutateur spécial, différent de celui de la machine de Clarke, est nécessaire pour obtenir, dans le circuit extérieur, un sens invariable de courant.

702. **Machine de d'Arsonval.** — Au moyen d'une ingénieuse disposition, d'Arsonval a pu obtenir l'inscription des intensités successives des courants, non redressés, fournis par les machines précédentes. Les courbes obtenues présentent des irrégularités et ne sont pas des sinusoïdes. Il était dès lors intéressant de réaliser une machine capable de fournir des courants dont l'intensité varierait rigoureusement suivant les ordonnées d'une courbe sinusoïdale et d'observer comparativement les effets de tels courants sur l'organisme.

D'Arsonval est arrivé à la production de courants sinusoïdaux en modifiant la forme de l'aimant de la machine de Pixii. Dans la machine de d'Arsonval (fig. 428), l'aimant mobile est constitué par deux aimants semi-circulaires dont les pôles de même nom sont en regard et à une petite distance l'un de l'autre; les deux pôles N et S de l'aimant résultant sont ainsi aux extrémités

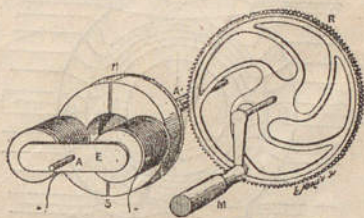


Fig. 428. — Machine à courants sinusoïdaux de d'Arsonval.

de l'autre; les deux pôles N et S de l'aimant résultant sont ainsi aux extrémités d'un même diamètre. Une roue dentée R et une manivelle M permettent de communiquer à l'aimant un mouvement de rotation devant les bobines fixes induites.

Afin de pouvoir faire varier à volonté la force électromotrice maxima, d'Arsonval a substitué, aux bobines fixes de l'appareil précédent, un anneau Gramme (§ 703) mobile, et à l'aimant mobile permanent un électro-aimant que l'on peut actionner avec une force électromotrice variable. Ce nouvel appareil est donc analogue à la machine Gramme dont il sera question dans le paragraphe suivant.

Le courant sinusoïdal est recueilli au moyen de deux frotteurs, qui sont mis en communication chacun avec une moitié de l'anneau mobile.

L'expérience a montré que les effets de tels courants sur l'organisme sont très variables suivant la longueur d'onde de la courbe qui en représente les variations d'intensité, c'est-à-dire suivant la fréquence des changements de sens du courant et par suite suivant la vitesse de rotation de l'aimant.

703. **Principe de la machine Gramme.** — L'organe essentiel de la machine est un anneau de fer doux sur lequel est enroulé en spirale un fil de cuivre isolé, dont les deux extrémités sont réunies l'une à l'autre. Cet anneau, qui a reçu le nom d'*anneau Gramme*, est placé dans l'espace annulaire compris entre les deux pièces polaires N et S (fig. 429) d'un aimant permanent ou d'un électro-aimant, suivant les modèles; il est donc aimanté par influence et possède, en regard des pôles S et N de l'inducteur, des pôles N' et S', qui sont respective-

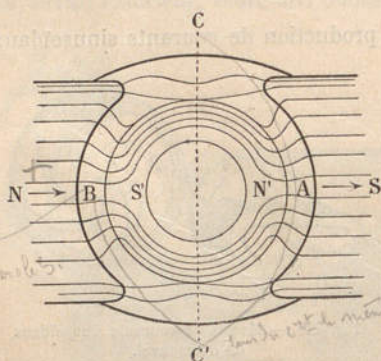


Fig. 429. — Principe de la machine Gramme.

ment de noms contraires aux précédents. Lorsqu'on fait tourner l'anneau autour d'un axe passant par son centre et normal à son plan, les pôles N' et S' se produisent toujours en regard des pôles S et N, ils restent donc fixes dans l'espace et les choses se passent comme si, l'anneau restant immobile, les spires du fil de cuivre glissaient autour de cet anneau.

Si l'anneau de fer doux n'existait pas, le champ magnétique compris entre les deux pôles de l'inducteur serait sensiblement uniforme; mais dans l'espace où il est placé, l'anneau dévie et rapproche les lignes de force, si bien que la plupart de celles qui le rencontrent cheminent dans sa masse et qu'il n'en pénètre presque point dans l'espace circulaire intérieur à l'anneau. La disposition que présentent alors les lignes de force est représentée sur la figure 429. Pendant leur déplacement, les diverses spires du fil de cuivre ne couperont donc les lignes de force que par leur partie extérieure à l'anneau.

Ces remarques faites, considérons d'abord le cas d'une spire unique tournant dans le sens CAC'B. Au voisinage de C, le nombre des lignes de force coupées par la spire, et par suite la variation du nombre des lignes qui traversent le circuit sont nulles; le nombre des lignes coupées et la variation d'intensité du champ vont, au contraire, en augmentant à mesure que la spire approche de A, puis en diminuant, quand cette même spire dépasse A, et de-

viennent de nouveau nuls en C' . La force électromotrice du courant induit est donc nulle en C , croissante de C en A où elle présente son maximum, et décroissante de A en C' où elle est de nouveau nulle. Les mêmes variations s'observent pendant la seconde demi-révolution de la spire de C' en B , puis en C , mais la force électromotrice a alors changé de signe, comme on peut s'en assurer en considérant le sens du courant développé dans la spire. En effet, de C en A le nombre n des lignes qui traversent le circuit de la spire va en diminuant et le sens du courant dans ce circuit est donc tel que sa face positive (celle qu'il faut regarder pour voir circuler le courant en sens inverse du mouvement des aiguilles d'une montre) soit tournée vers le pôle S où aboutissent les lignes de force. Dans la partie extérieure de la spire, le courant ira par suite d'arrière en avant par rapport au plan de la figure. Par contre, de A en C' , n augmente et la face positive du circuit est tournée vers le pôle N d'où partent les lignes de force; mais le plan de la spire a lui-même tourné, si bien que le courant va encore d'arrière en avant, par rapport au plan de la figure, dans la partie extérieure de la spire, et qu'il a dans cette spire le même sens qu'il avait de C en A ; le sens du courant reste donc le même pendant la demi-révolution CAC' . De C' en B , la spire a sa face positive tournée vers S , et par suite le courant va, sur la figure, d'avant en arrière dans la partie extérieure de la spire; il est facile de s'assurer que ce courant conserve, comme précédemment, le même sens pendant la demi-révolution $C'BC$, mais que ce sens change, dans la spire, lorsque cette spire traverse la ligne CC' qui a reçu pour cette raison le nom de *ligne de commutation*. On a donné également à cette ligne le nom de *ligne neutre*, parce que le courant s'annule dans la spire chaque fois que celle-ci passe sur cette ligne.

Si, au lieu de considérer une spire unique, on considère l'ensemble des spires enroulées sur l'anneau, on voit que toutes celles qui sont, à un moment donné quelconque pendant la rotation de l'anneau, d'un même côté de la ligne CC' , sont le siège de forces électromotrices dont les valeurs sont différentes d'une spire à la suivante, mais qui sont toutes de même sens; ces forces électromotrices s'ajoutent donc, comme le font les forces électromotrices de divers éléments de piles montés en série, et déterminent, dans toutes les spires situées d'un même côté de CC' , un courant résultant. Les courants résultants, ainsi développés dans les deux séries

de spires situées à droite et à gauche de CC' , sont d'ailleurs égaux, par raison de symétrie, et de sens contraires. Il est facile de voir que, par suite, si ces courants vont de C vers C' , par exemple, dans la série de droite, ils iront encore de C vers C' dans la série de gauche, après qu'ils ont changé de sens dans les spires. L'ensemble des spires peut donc être regardé comme constituant deux séries d'électromoteurs égaux deux à deux et montés en opposi-

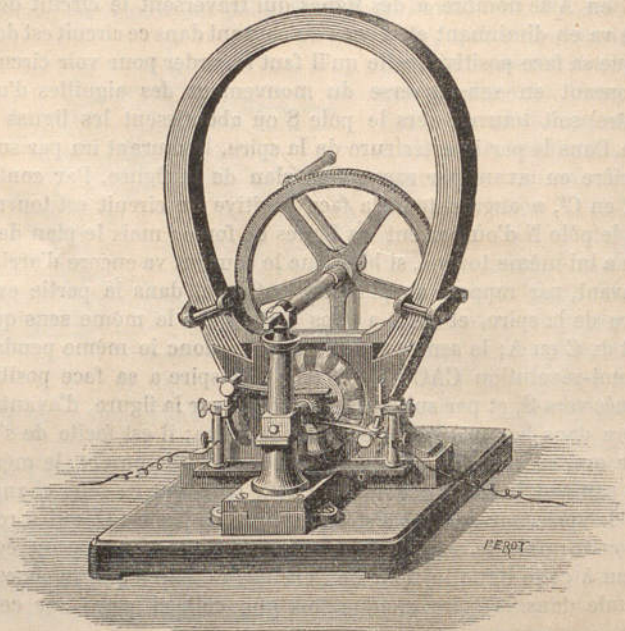


Fig. 430. — Machine Gramme.

tion (§ 653, note p. 915). Ces deux séries se font équilibre et ne produisent aucun courant si l'on réunit seulement leurs pôles de même nom, tandis que leurs actions s'ajoutent si l'on réunit, par un conducteur, le point de jonction de ces pôles.

Il suffira donc, pour recueillir dans un conducteur extérieur les deux courants de chaque moitié de l'anneau Gramme associés en quantité, de mettre en communication avec les deux extrémités du conducteur extérieur les deux spires qui passent à chaque instant aux deux extrémités opposées de la ligne neutre.

704. **Description de la machine Gramme.** — L'inducteur est tantôt un puissant aimant Jamin, comme sur le modèle de la figure 430, tantôt un électro-aimant qui est excité, soit par un électromoteur indépendant de la machine, soit par le courant de la machine même.

L'anneau est constitué par un faisceau circulaire de fils de fer doux isolés, afin d'éviter qu'il ne se produise dans sa masse des courants de Foucault; cet anneau, fixé sur un cylindre isolant, monté lui-même sur un axe de rotation, est mis en mouvement, soit à la main par l'intermédiaire d'une manivelle et d'un système d'engrenages, soit par un moteur au moyen d'une poulie et d'une courroie de transmission.

Le fil qui est enroulé sur l'anneau forme, comme on l'a repré-

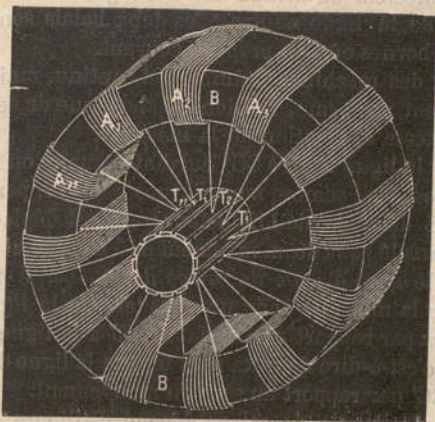


Fig. 431. — Collecteur et anneau de la machine Gramme.

senté schématiquement sur la figure 431, une série de bobines distinctes $A_1, A_2, A_3, \dots, A_{11}$ toutes enroulées dans le même sens. Ces bobines sont placées à côté les unes des autres et le bout finissant de l'une est relié au bout commençant de l'autre, si bien qu'elles constituent, en réalité, une bobine indéfinie, comme nous l'avons supposé dans le paragraphe précédent.

A cause du mouvement de l'anneau et de son axe, on a dû, pour recueillir les courants induits dans ces bobines, adopter un dispositif spécial qui constitue le *collecteur* de la machine. Le cylin-

dre isolant, sur lequel est fixé l'anneau, porte une série de lames de cuivre $T_1, T_2, T_3, \dots, T_{11}$, isolées les unes des autres et dont le nombre est égal à celui des bobines qui entourent l'anneau. Les deux extrémités de chaque bobine sont en relation avec deux lames consécutives et chacune de celles-ci, reliée au bout finissant de la bobine qui la précède et au bout commençant de la bobine qui la suit, établit la communication, dont nous avons parlé plus haut, entre les bobines consécutives; il suffira par suite, pour recueillir dans un circuit extérieur le courant de la machine, de mettre en contact les deux extrémités de ce circuit avec les lames diamétralement opposées du collecteur au moment où elles passent par la ligne neutre. On a recours pour cela à deux frotteurs, ou *balais*, constitués par des fils métalliques qui appuient sur la surface du collecteur au niveau des deux génératrices situées sur la direction de la ligne neutre. Ces deux balais sont, d'ailleurs, reliés à deux bornes où l'on prend le courant.

Le courant des machines Gramme est continu, mais il n'est pas rigoureusement uniforme. L'intensité moyenne de ce courant dépend de la vitesse de rotation de la machine.

En réalité, la ligne neutre CC' , suivant laquelle on doit disposer les balais, n'est pas, comme nous l'avons supposé, perpendiculaire à la ligne NS des pôles de l'inducteur; elle est déplacée d'un certain angle dans le sens du mouvement de l'anneau et l'on a donné à cet angle le nom d'*angle de calage des balais*. Il faut toujours faire tourner la machine dans un sens tel que la ligne des balais soit *en avance* par rapport à la normale CC' à la ligne des pôles de l'inducteur, c'est-à-dire dans un sens tel que la ligne des balais soit au delà de CC' par rapport au sens du mouvement.

La valeur de l'angle de calage dépend d'ailleurs de l'intensité du courant produit et par suite de la vitesse de rotation de la machine; aussi construit-on des machines avec des balais à *calage variable*.

La machine Gramme est trop puissante pour être employée directement aux divers usages médicaux; mais on peut, comme l'a ingénieusement fait Truchot, lui adjoindre des dispositions qui permettent de la plier à toutes les exigences de l'emploi thérapeutique des courants électriques.

705. **Transport électrique de l'énergie.** — Les machines d'induction jouissent, en général, d'une propriété sur laquelle est basée la transmission de la force à distance; elles sont *réversibles*. Il suffit

en effet, de faire passer dans l'induit un courant produit par un électromoteur pour voir cet induit subir, par rapport à l'inducteur, le déplacement relatif dont il est susceptible. Si, par exemple, on relie par deux fils conducteurs les deux balais d'une machine Gramme aux deux balais d'une machine identique et que l'on fasse tourner l'une des machines, le courant engendré met l'autre machine en mouvement.

Cette expérience a été réalisée pour la première fois, en 1873, par Fontaine à l'exposition de Vienne. La première machine, celle qui produit le courant sous l'action d'une force quelconque, a reçu le nom de *génératrice*; la seconde, celle qui tourne sous l'action du courant produit par la première, est appelée *réceptrice*. Le mouvement communiqué à la réceptrice peut, du reste, être utilisé pour actionner des outils ou fournir un travail mécanique quelconque, et comme le fil qui relie les deux machines peut avoir une grande longueur, on conçoit que l'on puisse ainsi transmettre à des distances considérables, et utiliser pour l'amener jusque dans des centres industriels, certaines forces naturelles, des chutes de cours d'eau en général, qui peuvent exister à certaines distances de ces centres.

Toutefois ce n'est pas sans perte qu'on transmet ainsi l'énergie électrique, car une portion du travail total T_1 fourni à la génératrice est employé à vaincre la résistance R du circuit formé par les deux machines et par les fils qui les relie et se transforme en chaleur dans ce circuit. Si l'on désigne par i l'intensité du courant qui parcourt le circuit, on voit que, d'après la loi de Joule, l'énergie ainsi transformée en chaleur est égale à Ri^2 ; la différence $T_1 - Ri^2$ pourra donc seule produire un travail utile dans la réceptrice. Ce travail utile transmis sera par suite, toutes choses égales d'ailleurs, d'autant moindre que la distance qui sépare les deux machines sera plus grande, puisque la résistance des conducteurs qui les relie augmente avec cette distance.

706. **Bobines d'induction.** — L'inducteur de ces appareils que l'on désigne souvent sous le nom de bobines de Ruhmkorff est une bobine dans laquelle circule un courant fréquemment interrompu.

Une bobine d'induction (fig. 432) comprend un noyau de fer doux C sur lequel est enroulé un gros fil de cuivre isolé, qui constitue la bobine inductrice BB ; celle-ci est placée au centre de la bobine induite $B'B'$ qui est formée d'un nombre considérable de tours d'un fil long et fin.

Le noyau de fer doux C est constitué par un faisceau de fils de fer isolés dans toute leur longueur et réunis seulement à leurs deux extrémités par deux armatures de fer doux; on évite ainsi la production de courants de Foucault qui seraient nuisibles au bon fonctionnement de l'appareil.

Le fil inducteur, gros et court (§ 696), ne forme que deux ou trois couches autour du noyau de fer doux et ses extrémités sont reliées aux pôles d'un électromoteur (piles ou accumulateurs), l'une $p'p'$ directement, l'autre $n'n'$ par l'intermédiaire d'un trembleur E déjà décrit (§ 688). Le fil induit qui, dans les grands modèles, a jusqu'à 120 kilomètres de long aboutit à deux bornes P' et N' qui sont les pôles de la bobine; ce fil, parfaitement isolé et

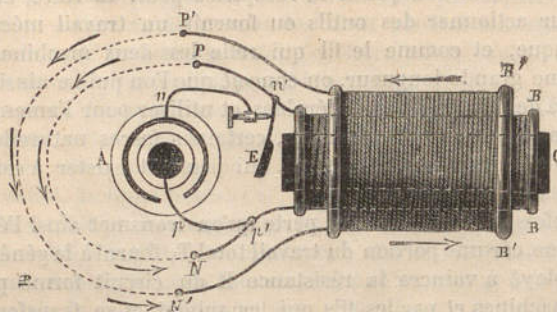


Fig. 432. — Bobine d'induction.

séparé du fil inducteur par un cylindre en verre, est enroulé sur ce cylindre non par couches cylindriques superposées, mais de manière à constituer une série de bobines de faible longueur que l'on juxtapose en les séparant par des cloisons isolantes, et en reliant une extrémité de chacune d'elles à une extrémité de la suivante. Grâce à ce *cloisonnement*, imaginé par Poggendorff, deux parties voisines du fil induit ne peuvent jamais être séparées par une longueur de fil aussi grande qu'avec le premier mode d'enroulement, elles ne peuvent donc jamais présenter une différence de potentiel aussi considérable et l'on risque moins de voir jaillir entre ces deux parties, à travers les couches isolantes qui les séparent, une étincelle qui détériorerait la bobine.

Quand le courant est lancé dans le fil inducteur, l'établissement de ce courant et l'aimantation du fer doux concordent, comme

nous l'avons indiqué déjà (§ 690), pour développer dans le circuit induit un courant inverse du courant inducteur. Au moment où, par suite de l'attraction du trembleur par le fer doux aimanté temporairement, le courant inducteur est interrompu, l'interruption de ce courant et la désaimantation du fer doux concordent encore pour développer dans le circuit induit un courant de même sens que le courant inducteur. Nous avons vu d'ailleurs (§ 696) que, par suite de la self-induction, la force électromotrice du courant induit de rupture est beaucoup plus grande que celle du courant induit de fermeture. Aussi la force électromotrice du courant induit de rupture est-elle seule capable, lorsque les deux pôles P' et N' sont assez éloignés, de vaincre la résistance de l'air en donnant une étincelle. Il en résulte que, chaque fois que l'étincelle éclate dans ces conditions, chaque pôle a toujours le même signe.

Au moment de chaque rupture du courant inducteur, une étincelle due à l'extra-courant de rupture dans la bobine inductrice jaillit entre le trembleur et la pointe de la vis qu'il abandonne, et il y a intérêt, au point de vue de la puissance de la bobine, à diminuer autant que possible cette étincelle qui rend moins brusques l'interruption du courant inducteur et la désaimantation de l'aimant. Fizeau a imaginé, pour réduire cette étincelle, de relier le trembleur et la vis aux deux armatures d'un condensateur à feuilles d'étain placé dans le socle de la bobine. La majeure partie de l'électricité mise en mouvement par la self-induction au moment de la rupture, au lieu de jaillir sous forme d'étincelle au niveau de l'interrupteur, va alors charger le condensateur; celui-ci se décharge ensuite à travers la pile et le fil inducteur, qui se trouvent ainsi parcourus par un courant de sens inverse à celui qui vient d'être interrompu. L'établissement de ce courant de décharge et la désaimantation brusque du fer doux qui en est la conséquence ⁽¹⁾ ont pour effet d'augmenter la force électromotrice du courant induit de rupture.

On rend aussi l'interruption du courant inducteur plus brève en remplaçant le trembleur E par un interrupteur à mercure imaginé par Foucault. Au-dessus d'une petite masse de mercure en communication avec l'une des extrémités du circuit inducteur, se trouve une pointe de platine réunie à l'autre extrémité de ce même circuit; cette pointe est fixée à l'extrémité d'une

(1) Ce courant tend en effet à aimanter le fer doux en sens inverse.

tige de fer doux animée d'un mouvement d'oscillation grâce à un électro-aimant dont le courant est fourni par une pile indépendante; le circuit inducteur est alors fermé chaque fois que la pointe de platine en s'abaissant s'enfonce dans le mercure, et interrompu chaque fois que la même pointe en se soulevant abandonne le mercure. Pour réduire autant que possible l'étincelle, on recouvre le mercure d'une couche d'alcool.

On construit des bobines qui peuvent donner des étincelles de 45 centimètres de longueur.

La bobine que nous venons de décrire est un *transformateur* qui, actionné par un courant inducteur, de force électromotrice faible E et d'intensité considérable I donne un courant induit d'intensité faible I' et de force électromotrice considérable E'. Si la transformation se faisait sans perte, on aurait :

$$EI = E'I'$$

On se sert, pour la distribution industrielle de l'électricité, de transformateurs basés sur le même principe que la bobine d'induction, mais disposés de façon à effectuer précisément la transformation inverse, c'est-à-dire à donner, avec un courant inducteur de force électromotrice considérable et d'intensité faible, un courant induit de force électromotrice beaucoup moindre mais d'intensité plus grande (1).

707. Emploi des bobines d'induction en Physiologie et en Médecine. — Les courants interrompus fournis par les bobines d'induction sont fréquemment utilisés en Physiologie et en Médecine. Les appareils employés sont généralement de petite dimension et dépourvus de condensateur, mais il est important de pouvoir alors régler à volonté, soit le nombre des interruptions par seconde du courant inducteur, soit l'intensité du courant induit.

Pour le nombre des interruptions on peut sans doute serrer plus ou moins la vis du trembleur, mais il vaut mieux se servir d'interrupteurs spéciaux, dont il existe divers modèles. Celui qui est représenté sur l'appareil de la figure 433 est constitué par une tige en fer doux I dont les oscillations, entretenues par un électro-aimant E placé sur le circuit du courant inducteur,

(1) Il suffit par exemple, pour obtenir ce résultat, d'enrouler sur un même anneau de fils de fer doux les deux circuits primaire et secondaire; mais le circuit primaire doit contenir, dans ce cas, un nombre de spires beaucoup plus considérable que le circuit secondaire.

servent à établir ou à interrompre ce courant. Un dispositif spécial permet, d'une part, d'incliner plus ou moins la tige I sur la verticale, d'autre part, de déplacer le centre de gravité de cette tige et de régler ainsi la durée de ses oscillations et par suite le nombre d'interruptions du courant inducteur.

On peut encore régler les interruptions du courant inducteur au moyen d'un électro-diapason convenablement choisi.

Les variations d'intensité du courant induit sont obtenues dans les appareils médicaux en rendant mobile la bobine induite H' (fig. 433) et en l'éloignant plus ou moins de la bobine inductrice H,

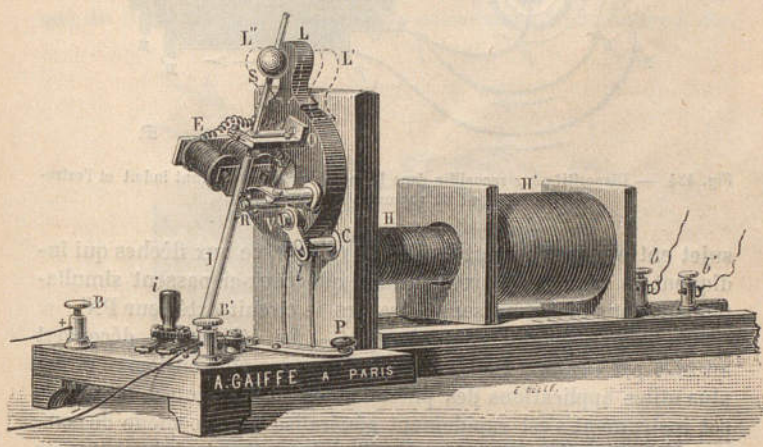


Fig. 433. — Appareil à chariot de Du Bois-Reymond avec trembleur de Gaiffe.

ou encore en introduisant plus ou moins profondément un cylindre de cuivre entre la bobine inductrice et le noyau de fil de fer doux qui se trouve à l'intérieur. Dans ce dernier cas il se développe par induction, dans le cylindre de cuivre, des courants dont l'action sur la bobine induite est précisément inverse de celle qu'exercent, sur cette même bobine, le courant inducteur et le fer doux.

On utilise parfois en Électrothérapie l'extra-courant de rupture. La figure 432 représente la disposition qui permet de recueillir, soit le courant induit, soit l'extra-courant de l'inducteur. Suivant, en effet, que le sujet sera placé sur le circuit P'N' ou sur le cir-

cuit PN, il sera soumis au premier ou au second de ces courants.

On peut aussi faire agir simultanément le courant induit et l'extra-courant de l'inducteur. Il suffit, pour cela, d'établir les communications représentées sur la figure 434 et de placer le

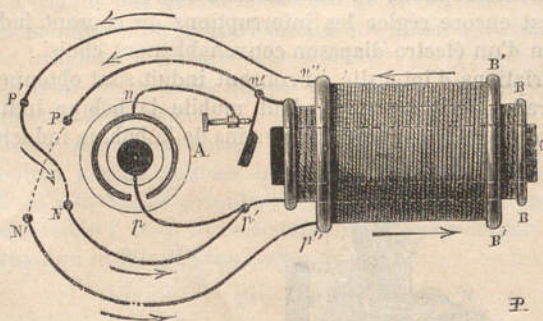


Fig. 434. — Dispositif pour recueillir dans le même circuit le courant induit et l'extra-courant de rupture de l'inducteur.

sujet entre P et N'; il est facile de voir, grâce aux flèches qui indiquent le sens des deux courants, que ceux-ci passent simultanément dans le même sens à travers le circuit extérieur PN'.

708. Téléphone et microphone. — Le téléphone, découvert en 1876 par Graham Bell, constitue l'une des plus curieuses et des plus utiles applications des phénomènes d'induction. L'emploi de cet instrument s'est rapidement généralisé comme mode de communication à distance et on l'utilise dans diverses circonstances en Clinique et en Physiologie.

Le téléphone de Bell se compose d'une mince rondelle de fer P (fig. 435), maintenue en place par deux pièces de bois vissées l'une sur l'autre, et d'un barreau aimanté A dont l'extrémité antérieure, située à petite distance de la rondelle P, est entourée, sur une petite longueur, d'une bobine B de fil très fin. Le fil FF de cette bobine suit latéralement le barreau aimanté et peut être mis en communication, par ses deux extrémités GG, avec les extrémités correspondantes du fil d'un second appareil identique à celui que nous venons de décrire.

Si l'on parle devant la plaque P de l'un des appareils (transmetteur), les vibrations aériennes engendrées ébranlent cette plaque qui effectue dès lors des oscillations dont l'intensité, la durée

et la forme dépendent de l'amplitude, du nombre et de la forme des vibrations aériennes produites. Ces oscillations déterminent des variations correspondantes dans l'intensité du magnétisme de l'aimant, et ces variations engendrent dans la bobine B des courants d'induction. Ceux-ci se propagent dans la bobine du second appareil (récepteur) et déterminent dans le magnétisme du barreau aimanté de cet appareil des variations d'intensité correspondantes à celles qui leur ont donné naissance dans le transmetteur. Sous l'influence des actions qu'exerce alors le barreau aimanté sur la plaque du récepteur, cette plaque entre en vibration, et ces vibrations reproduisent assez exactement celles de la plaque du transmetteur pour que l'on puisse ainsi transmettre à dis-

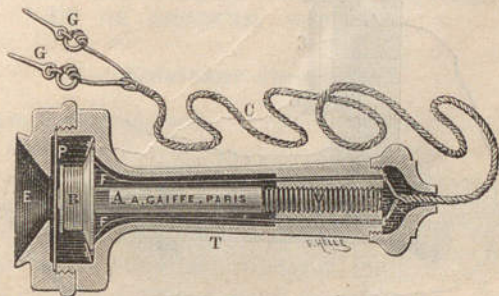


Fig. 435. — Téléphone.

tance la parole articulée ; toutefois les sons transmis sont très affaiblis.

Lorsqu'un téléphone fait partie d'un circuit sur lequel se trouve un interrupteur, la plaque subit un déplacement à chaque interruption si le circuit est parcouru par un courant, et l'oreille approchée du téléphone perçoit un son ou un bruit qui indique qu'un courant existe dans le circuit. Employé dans ces conditions, le téléphone constitue un galvanoscope très sensible qui est utilisé dans les explorations cliniques.

On remédie à la faible intensité des sons transmis ou produits par le téléphone à l'aide du microphone. Ce petit appareil, imaginé par Hughes, se compose, sous une de ses formes les plus simples, d'un crayon de charbon de cornue à gaz C (fig. 436), dont les extrémités, taillées en pointe, aboutissent à des crapaudines

creusées dans deux autres morceaux de charbon A et B implantés eux-mêmes dans une planchette verticale en bois ; le tout est porté par une seconde planchette horizontale munie, en guise de pieds, de deux tubes en caoutchouc destinés à soustraire l'appareil à l'influence perturbatrice des trépidations du meuble sur lequel repose le microphone.

Si l'on dispose cet appareil dans un circuit comprenant une pile P et un téléphone T, le charbon C étant simplement maintenu par son poids sans supporter de pression, le moindre ébranlement

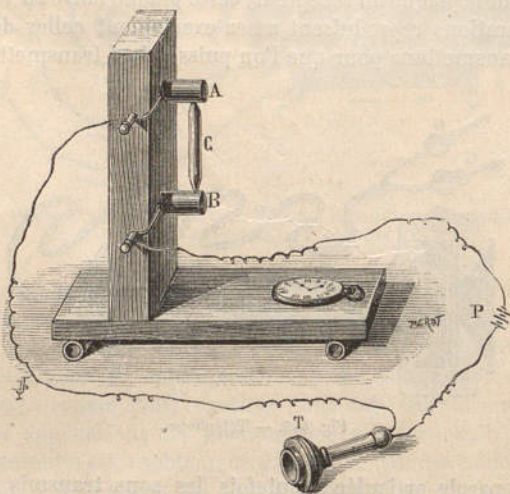


Fig. 436. — Microphone de Hughes.

communiqué à la planchette horizontale occasionnera en B et en A des variations de contact suffisantes pour modifier en ces points la résistance électrique du circuit et entraîner par suite des changements dans l'intensité du courant ; ces changements d'intensité se traduisent, comme nous l'avons dit plus haut, par des sons ou par des bruits qu'un observateur perçoit très nettement en approchant le téléphone de l'oreille.

Le tic-tac d'une montre placée sur la planchette, le bruit des pas d'une mouche sur la même planchette s'entendent très distinctement. Si l'on parle devant le microphone, les variations d'intensité du courant de la pile sont en rapport avec le nombre, l'intensité

et la forme des vibrations émises et les sons rendus par le téléphone reproduisent les paroles prononcées avec une intensité bien plus grande que si l'on s'était servi d'un téléphone pour transmetteur.

Grâce à l'emploi du microphone comme transmetteur on peut transmettre nettement, sans modification trop grande de timbre, la parole articulée à plusieurs centaines de kilomètres.

Les transmetteurs aujourd'hui employés, transmetteurs Ader et autres, sont des modèles plus ou moins perfectionnés du microphone de Hughes.

CHAPITRE X

ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE. TUBES DE GEISSLER ET DE CROOKES. RAYONS X.

I. — Éclairage électrique.

709. **Lampes à incandescence.** — Elles sont basées sur le dégagement de lumière qui accompagne le dégagement de chaleur engendré par le passage d'un courant dans un conducteur.

Le conducteur à employer doit être évidemment difficilement fusible; mais le platine, par exemple, qui satisfait à cette condition, est rapidement désagrégé par le passage du courant, lorsque le métal est porté à une très haute température. Edison a eu le premier l'idée de substituer aux conducteurs métalliques un fil de charbon obtenu avec un filament de bambou calciné à une température élevée. De cette substitution résultent deux avantages : le charbon résiste mieux que le platine; en outre son pouvoir émissif est plus élevé que celui de ce métal.

Pour empêcher d'ailleurs l'oxydation qui se produirait si le charbon était porté à l'incandescence dans l'air, le filament est enfermé dans une ampoule de verre à l'intérieur de laquelle on a fait le vide à $0^{\text{mm}}.01$ ou $0^{\text{mm}}.02$ de mercure (fig. 437); les extrémités du filament sont réunies à deux fils de platine qui traversent la paroi de l'ampoule et que l'on met en communication avec les deux pôles d'un électromoteur.



Fig. 437. — Lampe à incandescence.

La quantité de chaleur engendrée, et par suite l'intensité lumineuse des radiations émises, dépendant de l'intensité du courant et de la résistance du fil de charbon, il faudra régler l'intensité du courant d'après la résistance de la lampe à utiliser. Pour une intensité de courant trop faible, le filament de charbon n'émet pas assez de lumière; pour une intensité trop forte, le charbon est volatilisé.

L'emploi des lampes à incandescence est aujourd'hui assez répandu comme procédé d'éclairage; ce procédé présente sur les autres l'avantage de ne donner lieu à aucun produit de combustion pouvant vicier l'air des locaux éclairés.

710. Étincelle de rupture. Lampes à arc. — Lorsqu'on approche l'un de l'autre deux conducteurs en communication avec les deux pôles d'une pile ou d'une dynamo, on ne voit pas d'étincelle jaillir entre eux, quelque faible que soit la distance qui les sépare, à moins toutefois que la force électromotrice de la pile ou de la dynamo ne soit assez considérable pour établir entre les deux conducteurs une différence de potentiel analogue à celle que fournissent les machines électrostatiques ou les bobines d'induction. Il n'en est plus de même si l'on écarte les deux conducteurs après les avoir préalablement amenés au contact; il se produit alors une étincelle, même avec des piles d'un très petit nombre d'éléments.

Lorsque la force électromotrice de la pile ou de la dynamo est suffisante, sans être cependant égale à celle d'une machine électrostatique pouvant donner des étincelles dans les mêmes conditions, et que les extrémités des deux conducteurs sont maintenues à une distance très petite, l'étincelle se transforme en un trait lumineux continu auquel on a donné le nom d'*arc électrique*.

Ces faits peuvent s'expliquer de la façon suivante. Quand on écarte l'un de l'autre les deux conducteurs pour ouvrir le circuit, on diminue rapidement et progressivement leur surface de contact qui devient ainsi très petite et présente alors une résistance excessivement grande au passage du courant; il y a donc en ce point, d'après la loi de Joule, production d'une quantité de chaleur suffisante pour porter à l'incandescence et même volatiliser en partie les deux conducteurs.

En outre, lorsque le contact est rompu, des particules de chacun des conducteurs sont détachées par le courant et transportées, les unes, en général plus nombreuses, du pôle positif au pôle négatif, les autres en sens inverse; l'existence de ce double transport et la

présence de vapeurs incandescentes sont démontrées, soit par les dépôts que l'on observe sur chacun des conducteurs, soit par l'analyse spectrale de la lumière de l'arc. Dès lors la colonne gazeuse qui sépare les extrémités des conducteurs en regard, tout en étant encore très résistante, devient assez conductrice, grâce à la présence des particules détachées et transportées, pour permettre le passage du courant qui y détermine une forte élévation de température.

Ce n'est qu'avec des conducteurs en charbon que l'on peut obtenir un arc durable.

C'est du reste entre deux points de charbon que Davy a le premier vu jaillir l'arc électrique. L'arc obtenu dans ces conditions se compose de deux parties : l'arc proprement dit de couleur bleuâtre, et une flamme rougeâtre qui accompagne l'arc. Le charbon positif se creuse en forme de cratère, tandis que le charbon négatif s'apointe; tous deux sont portés à l'incandescence, mais le charbon positif est plus lumineux et s'use plus vite que le charbon négatif.

L'arc électrique est utilisé, par suite de sa haute température, pour fondre les substances les plus réfractaires, et l'intensité de la lumière qu'il émet en fait un puissant moyen d'éclairage.

On emploie généralement pour l'éclairage des baguettes de charbon fabriquées en calcinant à haute température une pâte composée d'un sirop de gomme et de sucre très épais, de charbon de coke en poudre et de noir de fumée. Pour obtenir un éclairage régulier, il faut maintenir à une distance convenable les deux extrémités des charbons qui s'écartent l'une de l'autre par suite de leur usure. On se sert généralement pour cela d'appareils spéciaux connus sous le nom de régulateurs (Foucault, Serrin, etc.).

Pour éviter l'emploi des régulateurs, Jablochhoff a eu l'idée de disposer parallèlement les deux baguettes de charbon en les séparant par une cloison isolante appelée *colombin* et formée de plâtre et de sulfate de baryte. Les deux extrémités des charbons, taillées en pointe, sont réunies par une amorce de charbon léger et poreux, qui est porté à l'incandescence par le passage du courant, et se consume rapidement en faisant place à l'arc; la chaleur de l'arc fond et volatilise le colombin à mesure que les charbons s'usent; dès lors si l'usure des deux charbons se fait également, comme cela a lieu avec des courants alternatifs, l'arc ne s'éteint que lorsque les charbons ont complètement brûlé.

La bougie Jablochhoff, qui a constitué la première solution pratique de l'éclairage par l'arc électrique, est aujourd'hui à peu près

abandonnée; grâce en effet aux perfectionnements apportés aux régulateurs, on obtient avec ces appareils une lumière beaucoup plus fixe.

711. **Éclairage électrique.** — Que l'on emploie pour cet éclairage les lampes à arcs et à régulateurs ou les lampes à incandescence, ces lampes peuvent être montées en série ou en dérivation.

Dans le montage en série, toutes les lampes sont placées sur le même conducteur, à la suite les unes des autres. La machine qui fournit le courant doit alors avoir une force électromotrice supérieure (à cause des pertes dues aux conducteurs) à la somme des différences de potentiel qui doivent exister aux deux bornes de chaque lampe pour que son fonctionnement soit assuré. L'intensité du courant à fournir ne doit pas, au contraire, augmenter notablement avec le nombre des lampes, à moins que la résistance de chacune de ces lampes ne soit assez grande; aussi cette disposition en série ne s'emploie-t-elle pas pour les lampes à incandescence à grande résistance. L'inconvénient de cette disposition est que, toutes les lampes étant solidaires, il faut que chacune d'elles soit munie d'un système qui la mette hors du circuit lorsqu'elle s'éteint, sinon toutes les autres lampes s'éteindraient simultanément.

Dans le montage en dérivation, chacune des lampes est branchée sur deux fils parallèles qui partent de la dynamo. La force électromotrice de la machine doit être alors seulement un peu supérieure, à cause des pertes, à la différence de potentiel exigée par une seule lampe, mais l'intensité du courant à fournir est sensiblement égale à la somme des intensités nécessaires pour actionner séparément chaque lampe. Les lampes sont ainsi indépendantes.

Si le courant fourni par la machine conservait toujours la même valeur, la force électromotrice de ce courant ou son intensité, suivant que l'on adopte la première ou la seconde disposition, deviendrait évidemment trop considérable lorsqu'une ou plusieurs lampes cesseraient de fonctionner; on pourrait sans doute remédier à cet inconvénient en remplaçant les lampes mises hors circuit par des résistances équivalentes, mais il y aurait ainsi perte inutile d'énergie et l'on préfère en général régler, soit à la main, soit automatiquement, la production de la dynamo d'après le nombre des lampes qui brûlent.

On adopte également, pour le montage des lampes, des dispositions mixtes qui dérivent des deux dispositions précédentes convenablement combinées.

Pour éviter que les lampes à incandescence ne soient brûlées par un courant trop fort, on intercale généralement sur le circuit de chacune d'elles un *brûle-circuit* constitué par un fil de plomb de diamètre convenable. Lorsque l'intensité du courant devient suffisante pour risquer de délériorer la lampe, ce fil de plomb est porté à l'incandescence, il fond et le circuit se trouve interrompu.

La consommation de l'électricité se calcule à l'aide de compteurs dont nous décrivons quelques modèles dans le Chapitre relatif aux instruments de mesure.

II. — Tubes de Geissler et de Crookes.

712. **Tubes de Geissler.** — Ce sont des tubes en verre de formes diverses contenant des gaz, dont la pression a été réduite à quelques millimètres de mercure. Ils sont munis de deux électrodes constituées par des fils de platine soudés dans le verre de manière que les extrémités de chacun de ces fils soient l'une à l'intérieur, l'autre à l'extérieur du tube.

Si l'on met ces deux électrodes en communication avec les deux pôles d'une machine électrostatique ou d'une bobine d'induction; le tube s'illumine d'une lueur qui paraît partir du pôle positif; dans le voisinage du pôle négatif, il existe un espace obscur, tandis que le pôle négatif est entouré d'une auréole violette. La couleur de la lueur qui remplit le tube dépend du gaz que le tube contient, ainsi que de la pression de ce gaz; cette couleur est plus vive dans les parties rétrécies que dans les parties larges du tube. Pour un certain degré de raréfaction, la lueur intérieure présente des bandes alternativement brillantes et obscures qui paraissent partir du pôle positif et qui ont été attribuées à l'intermittence de la décharge; ces bandes ont reçu le nom de *strates*. Il suffit d'approcher du tube un conducteur ou la main pour modifier l'aspect de ce phénomène de stratification.

La lueur des tubes de Geissler est, comme nous l'avons déjà indiqué, très apte à provoquer la fluorescence et la phosphorescence. Sous l'action de cette lumière, le verre du tube lui-même devient plus ou moins lumineux suivant sa nature. On réalise de très belles expériences en plongeant le tube de Geissler dans des liquides fluorescents ou en employant des tubes contenant des substances fluorescentes ou phosphorescentes.

713. **Tubes de Crookes.** — Les expériences de Hittorf, de Crookes,

de Goldstein, etc., ont montré que les phénomènes lumineux qui se produisent dans les gaz raréfiés, et que nous venons de décrire sommairement, présentent des caractères nouveaux lorsque la raréfaction est poussée assez loin. La matière, en vertu des propriétés caractéristiques qu'elle possède alors, serait, d'après Crookes qui a contribué pour une grande part à mettre ces propriétés en évidence, dans un état particulier aussi éloigné de l'état gazeux que ce dernier l'est de l'état liquide. Faraday avait admis, dès 1819, l'existence de ce quatrième état de la matière qu'il a appelé *état radiant*, et Crookes, en 1879, a montré qu'en effet la matière extrêmement raréfiée est douée de propriétés que l'on ne rencontre pas dans les corps gazeux à des pressions plus élevées.

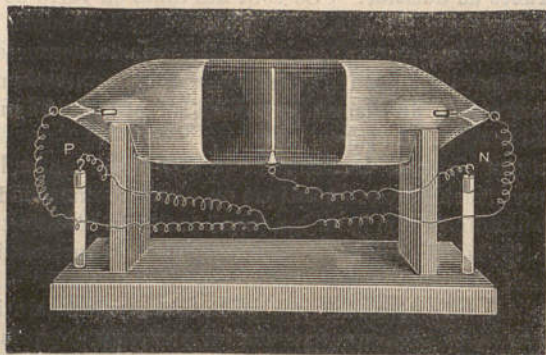


Fig. 438. — Espace obscur entourant la cathode.

Dans les tubes où se manifestent les phénomènes propres à l'état radiant, le vide a été poussé jusqu'à $\frac{1}{1000000}$ d'atmosphère, c'est-à-dire que la pression n'y est plus que de $0^{\text{mm}}.00076$ de mercure; les molécules matérielles sont alors relativement si peu nombreuses que leur course libre moyenne serait comparable aux dimensions du tube. Crookes déduit de là l'explication d'un phénomène présenté déjà par les tubes de Geissler, à savoir, l'espace obscur que l'on voit autour du pôle négatif pendant le passage d'un courant d'induction. En effet, la longueur de cet espace croît ou décroît suivant que le vide est plus ou moins parfait, et, sous une pression de $\frac{1}{1000000}$ d'atmosphère, elle atteint 25 millimètres; la figure 438 montre cette

région obscure s'étendant de part et d'autre d'une lame médiane d'aluminium qui constitue le pôle négatif, tandis que le fil positif du courant se dédouble et aboutit aux deux extrémités du tube. Le physicien anglais regardé cet espace comme mesurant la course libre moyenne des molécules qui se meuvent autour du pôle

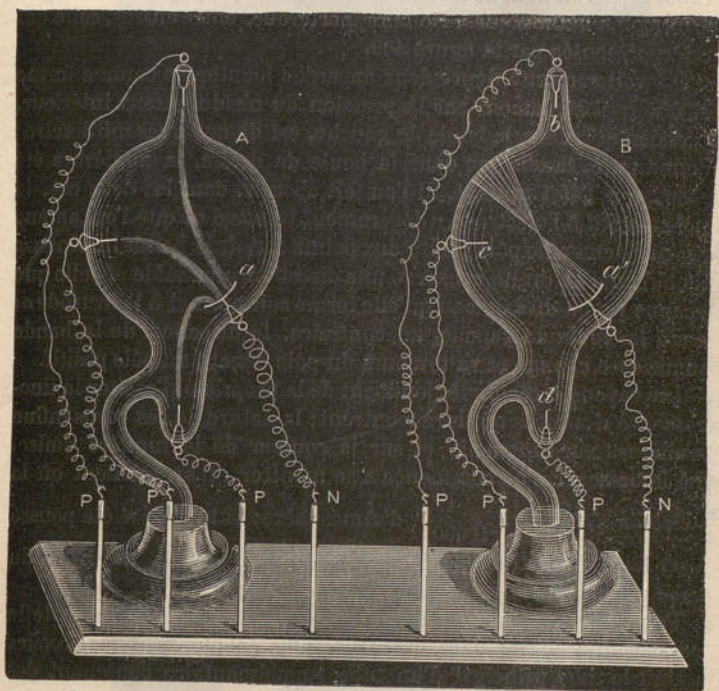


Fig. 439. — Différences entre les phénomènes présentés par le passage du courant suivant le degré de vide. Propagation rectiligne des rayons cathodiques.

négatif et qui n'entrent en collision avec d'autres molécules qu'à la distance où la lumière commence à se manifester; toutefois cette *théorie du bombardement*, n'est pas admise par tous et paraît même en contradiction avec certains faits sur lesquels nous ne pouvons insister ici.

Une des propriétés caractéristiques de la décharge dans les gaz très raréfiés est de s'échapper normalement de la surface de la

cathode au lieu de relier les deux électrodes. On donne actuellement le nom de *rayons cathodiques* à ce qui émane de la cathode dans ces conditions, sans que l'on puisse encore spécifier s'il s'agit là d'un agent matériel ou d'une forme spéciale de l'énergie.

Diverses expériences, dont la plupart ont été imaginées par Crookes, permettent de mettre en évidence la propagation rectiligne des rayons cathodiques. Nous rapporterons, entre autres, celle qui est représentée par la figure 439.

On voit sur cette figure deux appareils identiques comme forme et différant seulement par la pression du résidu gazeux intérieur, pression qui, dans la boule de gauche, est de quelques millimètres de mercure, tandis que dans la boule de droite, la matière a été amenée à l'état radiant. Si l'on fait aboutir, dans les deux cas, le pôle négatif à l'électrode *a* légèrement concave et que l'on amène successivement le pôle positif aux points *b, c, d*, la bande lumineuse de la boule de droite conserve une direction invariable et telle que chaque rayon du faisceau qu'elle forme soit normal à l'électrode *a*; dans la boule de gauche, au contraire, la direction de la bande lumineuse change et va toujours du pôle négatif au pôle positif.

Les rayons cathodiques jouissent de la propriété d'exciter la fluorescence des corps qu'ils rencontrent; la nature de ces corps influe d'ailleurs sur l'intensité et sur la couleur de la lumière émise. La fluorescence ne commence à se montrer qu'au moment où la

pression s'abaisse à $\frac{1}{1000000}$ d'atmosphère; si le vide a été poussé trop loin, toute trace de lumière disparaît, l'espace intérieur du tube perdant alors sa conductibilité électrique.

Pour montrer les caractères lumineux différents que présente le passage du courant dans un gaz de plus en plus raréfié, Crookes munit le tube principal d'un tube supplémentaire contenant des fragments de potasse que l'on chauffe, afin de provoquer un dégagement de vapeur d'eau, lorsqu'on veut augmenter la pression intérieure, et que l'on refroidit quand, au contraire, on désire opérer sous la plus faible pression possible.

La propagation rectiligne des rayons cathodiques et la phosphorescence que déterminent ces rayons sont mises en évidence dans l'expérience suivante. Un tube (fig. 440) est muni intérieurement d'un écran en aluminium *b*; au moment où l'on vient à faire passer un courant d'induction dans le sens indiqué par les lettres *P* et *N*, on obtient sur le fond du tube l'ombre *cd* limitée par les points où

cesse la phosphorescence. Un fait curieux à signaler, au sujet de cette expérience, est la difficulté de plus en plus grande avec laquelle le verre répond à l'excitation des rayons cathodiques ; lorsque cette excitation s'est produite pendant un certain temps,

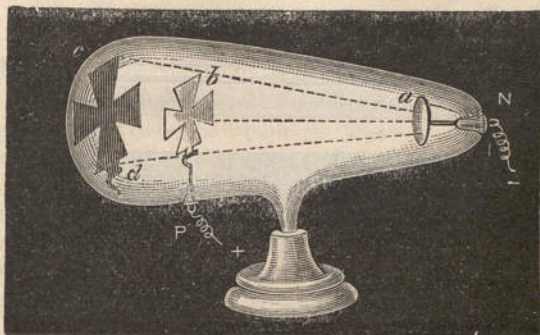


Fig. 440. — Ombre d'un écran porté par les rayons cathodiques.

la phosphorescence devient de moins en moins vive. On montre ce fait en faisant basculer l'écran *b*, que le constructeur a rendu mobile autour d'une charnière ; la portion *cd* du verre (fig. 441), qui était protégée tantôt contre les rayons cathodiques, et qui se détachait en noir sur le fond illuminé du tube, subit alors l'action

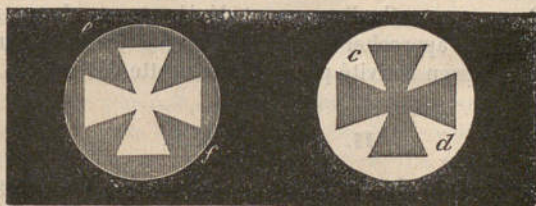


Fig. 441. — Variations de l'intensité de la phosphorescence avec la durée d'action des rayons cathodiques.

de ces rayons et la lumière qu'elle émet est plus vive que celle des parties environnantes excitées depuis plus longtemps ; aussi obtient-on alors une croix lumineuse *e f* (fig. 441) sur fond moins brillant.

Les rayons cathodiques sont capables de produire une élévation de température considérable. Si, au moyen d'une électrode négative

tive concave, on concentre sur un point de la paroi du tube un faisceau de rayons cathodiques, la chaleur dégagée est assez intense pour faire fondre le verre. On peut même fondre ainsi une lame de platine placée au foyer d'une cathode sphérique concave.

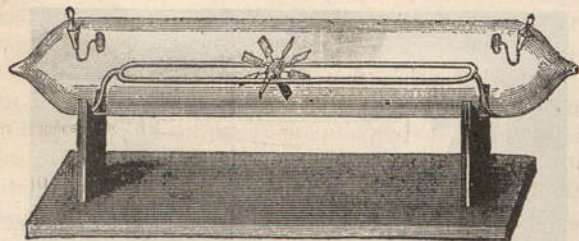


Fig. 442. — Actions mécaniques produites par les rayons cathodiques.

Les rayons cathodiques peuvent également produire des actions mécaniques; Crookes l'a montré au moyen du tube de la figure 442; le constructeur a placé à l'intérieur de ce tube un système de deux rails parallèles sur lesquels peut se déplacer en roulant l'axe d'une roue à palettes; les électrodes que l'on voit aux extrémités du tube sont disposées à un niveau tel que les rayons qui en émanent pendant que l'une ou l'autre constitue la cathode, rencontrent le bord supérieur des palettes. Lorsque le courant passe, la roue tourne en s'éloignant de l'électrode que l'on a choisie comme cathode.

Enfin les rayons cathodiques sont déviés par un champ magnétique; il suffit d'approcher un aimant ou un électro-aimant d'un tube de Crookes en activité pour observer cette déviation.

III. — Rayons X.

714. Découverte de Röntgen. — A la suite des paragraphes précédents, il convient de placer la mémorable découverte des rayons X (janvier 1896) par le professeur Röntgen de Wurtzbourg, non que ce soit là la place définitive du nouveau phénomène, dont la nature n'a pu être encore déterminée, mais parce que les tubes de Crookes sont jusqu'à présent, sinon la source unique, du moins la source la plus intense de ces nouvelles actions, baptisées provisoirement par Röntgen du nom de *rayons X*; on ne sait encore d'ailleurs si ce nom de rayon est lui-même bien

justifié, c'est-à-dire si la nature intime du phénomène consiste réellement dans un mouvement vibratoire.

Lénard avait constaté que les rayons cathodiques pouvaient traverser une lame d'aluminium dont il avait formé la paroi anticathodique du tube en expérience, que ces rayons se propageaient dans l'air et qu'ils avaient, entre autres, la propriété de traverser certains des corps les plus opaques pour les radiations lumineuses. L'esprit de cet ouvrage ne comporte pas l'analyse des nombreux et importants travaux qui ont été publiés sur cette question ; toutefois il était utile d'indiquer le point de départ de recherches dont on ne peut, il est vrai, encore prévoir les conclusions, mais qui expliquent dans une certaine mesure la possibilité de la découverte sensationnelle des rayons X.

Röntgen ayant enveloppé de carton, opaque à la lumière, un tube de Crookes dont les parois étaient entièrement en verre, constata qu'un écran recouvert de platino-cyanure de baryum, corps fluorescent, devenait lumineux lorsqu'on le plaçait à une certaine distance du tube en activité. Les rayons qui déterminaient ce phénomène sont d'ailleurs différents des rayons de Lénard, non seulement parce que le tube employé était entièrement en verre, mais encore parce que leurs propriétés sont différentes de celles des rayons qui traversent la paroi en aluminium d'un tube de Lénard. De ces propriétés, très incomplètement connues encore, la plus curieuse actuellement, celle dont l'importance pratique est jusqu'à ce jour la plus grande et qui a fait que la découverte de Röntgen a immédiatement franchi les limites des laboratoires pour se signaler à l'attention du monde entier, consiste dans la transparence relative des divers corps pour les nouveaux rayons. D'une manière générale, en effet, tous les corps minéraux et tous les corps complexes qui contiennent des composés minéraux sont relativement opaques, tandis que, par contre, tous les composés purement organiques sont relativement transparents. Les os, en particulier, possèdent une opacité assez grande due aux sels de chaux qu'ils contiennent, tandis que les autres tissus de l'organisme, dans lesquels les composés minéraux sont beaucoup moins abondants, jouissent d'une transparence assez considérable. De là l'explication de la fantastique expérience par laquelle Röntgen a montré la possibilité d'explorer le squelette d'un être vivant. Ayant, en effet, interposé sa main entre le tube de Crookes, recouvert de carton, et l'écran en platino-cyanure, Röntgen aperçut sur

celui-ci la silhouette de son propre squelette qui se détachait en sombre sur l'écran rendu plus ou moins fluorescent dans les autres parties.

715. Propriétés des rayons X. — Au moment où ce paragraphe est livré à l'impression, les principales propriétés connues des rayons X sont les suivantes.

Les rayons X sont émis par les régions du verre que viennent rencontrer les rayons cathodiques intérieurs. L'intensité de l'émission est sensiblement la même suivant toutes les directions, normale ou obliques (Imbert et H. Bertin-Sans, Gouy).

La transparence d'un corps pour les rayons X paraît être, d'une manière générale, d'autant plus grande ou d'autant plus petite que la densité du corps est plus faible ou plus forte, ce qui s'accorde avec la transparence relative, indiquée déjà plus haut, des composés minéraux et organiques.

Les rayons X ne se réfléchissent et ne se réfractent pas à travers les corps qu'ils traversent, mais poursuivent toujours leur route en ligne droite (Röntgen); ils n'interfèrent pas, ou du moins il a été jusqu'à présent impossible d'obtenir trace visible d'interférence (Perrin, Meslin, etc.), mais ils éprouvent à la surface de certains corps, tels que le verre, les métaux, la paraffine, etc., une diffusion appréciable (Imbert et H. Bertin-Sans, Battelli et Garbasso).

De même que les rayons ultra-violet, les rayons X jouissent de la propriété de décharger les corps électrisés (Benoist et Hurmuzescu, Dufour, J.-J. Thomson); cette propriété a été utilisée pour démontrer que l'intensité d'un faisceau de rayons X varie en raison inverse du carré de la distance de la source des rayons au point où l'on mesure cette intensité (Benoist et Hurmuzescu), et pour apprécier l'influence, sur le rendement en rayons X, de telle ou telle modification apportée dans le dispositif employé pour obtenir des radiographies (Chappuis), etc.

Les rayons X ne sont pas, comme les rayons cathodiques intérieurs ou comme les rayons de Lénard sortis du tube à travers une lame d'aluminium, déviés par l'action d'un aimant (Röntgen, O. Lodge); toutefois, lorsque ces rayons ont traversé un corps électrisé, un aimant peut les dévier et le sens de la déviation dépend du signe de l'électricité que possédait le corps électrisé (Lafay).

Les rayons X sont capables, comme les rayons violets et ultra-violet, de déterminer des actions chimiques et en particulier d'agir

sur les composés incorporés à la gélatine qui recouvre les plaques photographiques.

716. **Radiographie.** — On appelle ainsi la silhouette que l'on obtient lorsque, après avoir interposé un objet plus ou moins opaque aux rayons X entre une plaque sensible et un tube de Crookes en activité, on traite la plaque, comme après son exposition à la lumière, en vue de l'obtention d'un cliché photographique.

Pendant cette exposition, les rayons X ont été plus ou moins complètement arrêtés par les régions plus ou moins opaques des corps interposés et ont ainsi déterminé sur la plaque une sorte d'ombre des diverses régions du corps. La plaque aura par suite été plus ou moins impressionnée dans ses diverses parties, comme elle l'est lorsqu'on fait former sur la couche de gélatine l'image d'un corps éclairé. En développant, puis fixant la plaque, on obtiendra donc la silhouette du corps interposé et de ses diverses régions plus ou moins opaques. Il importe de remarquer que cette silhouette ne peut avoir qu'une netteté comparable, non à celle d'une image fournie par un objectif, mais seulement à celle d'une ombre chinoise à laquelle on peut exactement assimiler le dessin fixé sur la plaque sensible.

717. **Technique de la radiographie.** — Cette technique est loin d'être encore fixée, car des perfectionnements divers y sont presque journellement apportés; aussi ne doit-on regarder ce qui suit que comme ayant rapport au mode opératoire actuel.

Disons tout d'abord que, afin de mettre la plaque sensible à l'abri de toute lumière (lumière diffuse de la salle dans laquelle on opère ou lumière directe résultant de la fluorescence des parois du tube de Crookes) la plaque doit être enveloppée de plusieurs doubles de papier noir dit *aiguille*, que les rayons X traversent seuls.

Diaphragme. — Les clichés radiographiques n'étant constitués, comme nous venons de le faire remarquer, que par des ombres portées, la netteté en sera d'autant plus grande, toutes choses égales d'ailleurs, que, d'une part, l'objet à radiographier sera moins épais ou sera plus près de la plaque, et que, d'autre part, la surface d'émission des rayons X aura un diamètre plus petit. De là résulte l'augmentation considérable de netteté que l'on obtient en limitant la surface utilisée des parois du tube de Crookes par un écran opaque aux rayons X (métal, verre épais) percé d'une ouverture (Imbert et H. Bertin-Sans). La figure 443, qui est la reproduction de la radiographie d'une grenouille, montre

quel degré de netteté on a pu réaliser, au lendemain même de la découverte de Röntgen, par l'emploi d'un diaphragme.

Aimant. — Les rayons cathodiques, qui émanent de la cathode plane d'un tube de Crookes, constituent un faisceau divergent dans la partie centrale duquel n'existe aucun ou presque aucun de ces rayons. Par suite de cette forme, la région de la paroi anti-cathodique, qui est rencontrée par ces rayons et qui émet

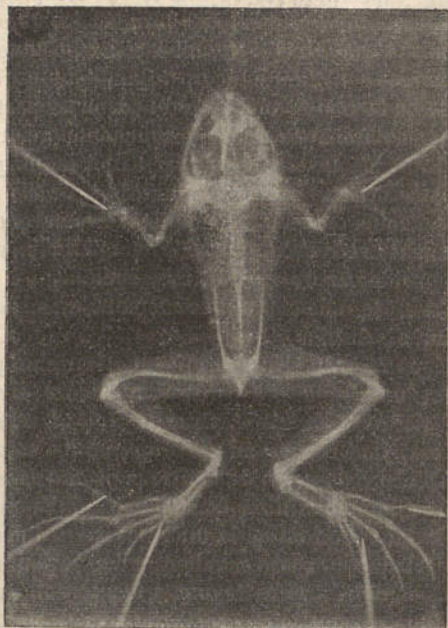


Fig. 443. — Radiographie d'une grenouille.

des rayons X, est dès lors assez étendue. Or si, au moyen d'un aimant ou d'un électro-aimant, on dévie les rayons cathodiques intérieurs de manière à leur faire rencontrer la paroi plus près de la cathode, alors qu'ils sont moins dispersés (Imbert et H. Bertin-Sans, Chappuis) ou même de manière à les condenser (Meslin), on détermine une fluorescence plus intense du verre et une émission plus abondante de rayons X, ce qui permet d'abaisser notablement le temps de pose qui était d'abord assez considérable.

Interrupteur. — Le nombre des interruptions par seconde du courant primaire de la bobine qui actionne le tube de Crookes et le mécanisme par lequel ces interruptions sont produites exercent une influence marquée, toutes choses égales d'ailleurs, sur l'intensité de la fluorescence des parois du tube et sur la quantité de rayons X émis. L'observation montre qu'il y a grand avantage à se servir d'un interrupteur de Foucault (Chappuis) et que l'on peut ainsi obtenir une nouvelle réduction du temps de pose qui, lorsqu'il s'agit de radiographier la main par exemple, peut être réduit, si l'on fait en outre usage d'un aimant, à quelques secondes. Ajoutons toutefois que, pour obtenir de semblables résultats, il est nécessaire d'avoir un courant assez puissant (10 ampères environ) et une bobine capable de donner des étincelles d'une longueur de 15 à 20 centimètres.

Tube. — C'est sur les tubes que paraissent devoir se porter plus spécialement les efforts actuellement faits pour augmenter l'intensité de la source des rayons X. Après avoir utilisé les tubes à forme sphérique ou à forme d'ampoule, on a fait usage de tubes cylindriques d'un diamètre assez petit pour qu'ils pussent être placés entre les branches d'un aimant en fer à cheval ou d'un électro-aimant. On se sert actuellement de tubes dits *focus*, imaginés par S. Thomson et dont le rendement en rayons X, sans emploi de l'aimant, est très notablement supérieur à celui des autres tubes. Dans les tubes focus actuels, la cathode, sphérique et concave, concentre les rayons cathodiques sur une lame de platine qui termine l'anode, et qui est orientée obliquement par rapport aux rayons qu'elle reçoit. C'est alors de cette lame de platine qu'émanent les rayons X. L'expérience a montré en effet que divers corps sont capables d'émettre des rayons X lorsqu'ils reçoivent des rayons cathodiques; le platine est d'ailleurs considéré, jusqu'à aujourd'hui, comme le corps qui possède cette propriété au plus haut degré.

718. Résultats. — On peut dire sans exagération que, après quelques mois seulement d'efforts combinés, les résultats obtenus ont amplement confirmé les espérances les plus optimistes conçues au moment même de la découverte de Röntgen, quant aux renseignements que le diagnostic médical paraissait devoir retirer du nouveau mode d'exploration.

On a pu, en effet, obtenir des radiographies nettes du squelette de toutes les parties du corps, main (fig. 444), coude (fig. 445),

épaule, pied, genou, vertèbres lombaires, etc., reconnaître quelquefois l'existence soit de minimales fractures qui avaient pu échapper à un examen attentif fait par les autres procédés d'investigation, soit d'altérations osseuses que l'on n'avait pu diagnostiquer par les symptômes observés; on a pu de même déceler la présence dans les tissus de corps étrangers opaques aux rayons X, et en

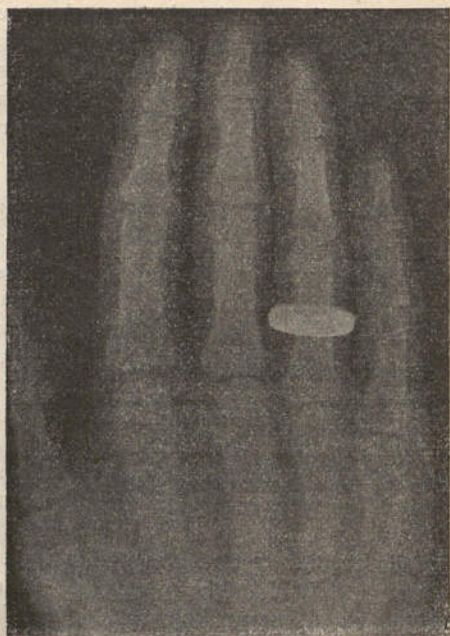


Fig. 444. — Radiographie d'une main normale d'adulte.

déterminer la position exacte, soit par des épreuves stéréoscopiques (A. Imbert et H. Bertin-Sans), soit par des mensurations effectuées sur des épreuves prises dans des conditions particulières, etc.

Aussi peut-on dire que, quelle que soit au point de vue scientifique la portée de la découverte de Röntgen, la pratique médicale est appelée à bénéficier dans une large mesure des propriétés des rayons X.

Ajoutons que la découverte de ces rayons a été comme la cause déterminante d'une série de recherches qui ont amené à affirmer l'existence d'autres radiations, non soupçonnées jusqu'à ce jour et jouissant comme les rayons X de la propriété de traverser cer-



Fig. 445. — Radiographie d'un coude normal d'adulte.

tains corps, opaques pour les rayons lumineux; si bien qu'on est peut être en présence d'une catégorie de phénomènes nouveaux, plus différents par leur intensité que par leur nature et susceptibles de conduire, par leur ensemble, à la détermination d'une cause peut-être commune.

CHAPITRE XI

PHÉNOMÈNES DIVERS. OSCILLATIONS ÉLECTRIQUES.
COURANTS ALTERNATIFS DE HAUTE FRÉQUENCE.

719. **Objet du chapitre.** — Dans les divers Chapitres qui précèdent, il n'a nulle part été question d'une théorie générale des phénomènes électriques ni de la nature intime de ces phénomènes. C'est qu'en effet cette théorie n'est pas établie encore et que la cause première des phénomènes électriques n'a pu encore être déterminée.

Ce n'est pas cependant que les tentatives faites pour combler ces lacunes soient restées complètement infructueuses. C. Maxwell, par une puissante conception et d'ingénieuses hypothèses sur la constitution « d'un milieu universel (éther) de densité réelle, mais faible, susceptible de recevoir un mouvement et de le transmettre d'un point à un autre, avec une vitesse très grande, mais finie », a pu assigner une cause à un certain nombre de phénomènes déjà connus (action des courants parallèles, sens des courants d'induction, etc.), et établir *a priori*, entre certains coefficients électriques et certains coefficients optiques, des relations dont l'expérience a démontré l'exactitude. Mais l'exposé, même sommaire, de la théorie de Maxwell, qui établit des rapprochements inattendus entre deux catégories de phénomènes regardées comme absolument distinctes, n'entre pas dans l'esprit de cet ouvrage, car cette théorie est trop peu avancée encore pour qu'on puisse la prendre pour guide dans l'étude générale et surtout expérimentale que nous avons à faire des phénomènes électriques.

Aussi nous bornerons-nous, en ce qui concerne le point de vue théorique, à dire qu'il suffira peut-être de développer la conception première de Maxwell pour en faire jaillir la vérité toute entière et nous nous contenterons d'aborder dans ce dernier Chapitre l'étude sommaire d'un certain nombre de faits dont la description n'a pas trouvé place ailleurs et qui établissent aussi, entre les phénomènes électriques et lumineux, et par l'expérience seule, des rapports ou des analogies identiques ou comparables à ceux qui résultent de la conception de Maxwell.

720. **Actions des radiations sur l'électricité.** — Un plateau métallique isolé et relié par un fil métallique à un électromètre à

quadrans s'électrise positivement (comme le montre la déviation de l'aiguille de l'électromètre) lorsqu'on l'éclaire par la lumière solaire ou par une lumière riche en radiations ultra-violettes (Albert Nodon). Si, en face et à une petite distance du plateau, on place un grillage métallique, celui-ci se charge négativement dans les mêmes conditions (Righi et Stoletow). La charge des deux plateaux est augmentée si l'on fait arriver sur eux un courant d'air pendant qu'on les éclaire (Bichat et Blondlot).

Un électroscope à feuilles d'or chargé et abandonné à lui-même perd plus ou moins rapidement sa charge, suivant que l'air qui l'environne est plus ou moins humide. Mais si l'on fait tomber sur le bouton de l'instrument un faisceau de radiations ultra-violettes, la déperdition d'électricité est, toutes choses égales d'ailleurs, beaucoup plus rapide (Hallvachs).

Enfin les rayons ultra-violettes favorisent certaines décharges électriques (Hertz), comme on peut s'en assurer en écartant, jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'étincelle, les deux branches d'un excitateur relié à une bobine de Ruhmkorff; si l'on éclaire alors les deux extrémités, entre lesquelles peuvent éclater les étincelles, par une lumière riche en rayons ultra-violettes, on voit les étincelles jaillir de nouveau.

721. Action de l'électricité sur la propagation des radiations. —

a. — Un corps diélectrique monoréfringent, placé entre les armatures d'un condensateur devient biréfringent quand le condensateur est chargé; l'expérience réussit très bien avec le sulfure de carbone. Ce phénomène est connu sous le nom de *phénomène de Kerr* du nom de celui qui l'a découvert.

b. — Tout corps transparent, qu'il soit à l'état solide, liquide ou gazeux, acquiert, lorsqu'il est placé dans un champ magnétique, la propriété de faire tourner d'un certain angle le plan de vibration d'un rayon de lumière polarisée qui le traverse. Ce phénomène, qui a été découvert par Faraday et dont Verdet a complété l'étude, est régi par la loi suivante :

La rotation du plan de vibration est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelle à l'épaisseur traversée, à l'intensité du champ, au cosinus de l'angle que fait la direction du rayon lumineux avec les lignes de force du champ et à un coefficient qui dépend de la nature du corps et de la longueur d'onde de la radiation considérée.

La rotation du plan de vibration est donc nulle quand la direction du rayon lumineux est perpendiculaire à celle des lignes

de force, et acquiert sa valeur maxima quand ces deux directions coïncident, mais le sens de cette rotation est indépendant du sens dans lequel se propage le rayon par rapport au sens des lignes de force. Le sens de la rotation est le même que celui du courant auquel est dû le champ magnétique pour les corps diamagnétiques; il est inverse pour les corps magnétiques.

Toutes choses égales d'ailleurs, l'action du champ est moindre sur les corps biréfringents que sur les corps monoréfringents, sur les gaz et sur les vapeurs que sur les solides et sur les liquides. Si le rayon polarisé qui traverse le corps placé dans le champ n'est pas homogène, les plans de vibration des diverses radiations seront dispersés par suite de l'inégale valeur de la rotation qui leur est imprimée.

Enfin la rotation du plan de vibration étant, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelle à l'intensité du champ, on conçoit qu'il soit possible de déduire cette intensité, et par suite celle du courant qui produit le champ, de la rotation observée dans ce champ.

Ces phénomènes de rotation du plan de vibration sont faciles à observer en plaçant le corps à étudier dans l'axe d'une forte bobine ou mieux d'un puissant électro-aimant, dont le noyau est creux, et disposant le tout entre deux nicols; ils peuvent être prévus par la théorie de Maxwell.

722. Décharges oscillatoires. — La décharge de deux conducteurs portés à des potentiels différents, des deux armatures d'un condensateur par exemple, peut, dans certaines conditions qui dépendent de la capacité des deux conducteurs, de la self-induction et de la résistance du circuit traversé par la décharge, s'effectuer d'une façon continue ou d'une façon oscillatoire.

Dans le premier cas, l'intensité du courant de décharge, nul au début, atteint rapidement une valeur maxima et retombe à zéro en décroissant régulièrement et progressivement. Dans le second cas, le phénomène est plus complexe; il y a en réalité une série de décharges d'intensités décroissantes qui se font alternativement dans un sens et dans l'autre, si bien que l'intensité du courant de décharge peut être représentée par une sinusoïde d'amplitude décroissante. A cause de la rapidité de la décharge et de la persistance des impressions lumineuses, l'étincelle qui se produit pendant cette décharge paraît unique, mais elle est en réalité composée d'une succession d'étincelles, comme on peut s'en assurer en la regardant dans un miroir tournant.

Le nombre des oscillations de la décharge par seconde, et par suite la période de ces oscillations, dépendent, pour une même capacité des conducteurs, de la résistance et de la self-induction du circuit traversé par la décharge. C'est ainsi que Hertz, d'une part, a pu élever le nombre de ces oscillations jusqu'à 30 billions par seconde et plus récemment Lebedew jusqu'à 50 billions, tandis que Potier et O. Lodge ont réussi à l'abaisser jusqu'à ramener dans la limite des sons perceptibles le son qui résulte des ébranlements dus aux décharges successives. Enfin, en donnant au circuit de décharge une résistance suffisante, on peut rendre la décharge continue.

On peut concevoir ces phénomènes en comparant la décharge mutuelle de deux corps, dont les potentiels sont différents, à l'écoulement d'un liquide dans un tuyau qui établit la communication entre deux vases A et B remplis jusqu'à des niveaux différents. Suivant la viscosité du liquide et suivant la résistance que le tuyau, en raison de sa forme et de ses dimensions, peut opposer aux déplacements du liquide, l'égalité de niveau pourra s'établir régulièrement et progressivement dans les deux vases, l'écoulement du liquide se faisant toujours dans le même sens et s'arrêtant dès que l'égalité de niveau est atteinte, ou au contraire, cette égalité ne pourra s'établir qu'après des oscillations plus ou moins rapides; dans ce cas et par suite de la vitesse acquise par le liquide qui s'écoule de A en B, le liquide dépasse en B sa position d'équilibre, revient vers A où il dépasse encore cette position d'une quantité moindre et ainsi de suite, si bien que le tuyau de communication est alternativement traversé par des courants de sens contraires et de moins en moins forts.

O. Lodge a montré que l'explication de certains effets des décharges instantanées doit être cherchée dans les oscillations de la décharge. Nous ne saurions insister ici sur ces phénomènes, mais nous devons rapporter plus en détail les expériences par lesquelles Hertz a établi que les décharges oscillantes produisaient, dans le milieu ambiant, des ondes électriques jouissant de propriétés analogues à celles des radiations calorifiques, lumineuses ou chimiques.

723. **Expériences de Hertz.** — Hertz a d'abord imaginé une disposition qui permet d'obtenir d'une façon continue des oscillations très rapides. L'appareil (fig. 446), qui a reçu le nom d'*excitateur* ou de *vibrateur*, est constitué par deux sphères A et B ou deux lames métalliques munies chacune d'une tige conductrice dont l'extrémité

est terminée par un petit bouton métallique. Les deux tiges conductrices sont disposées suivant une même direction rectiligne, et les deux boutons, situés en regard et à une faible distance l'un de l'autre, sont reliés aux deux extrémités du fil induit d'une bobine de Ruhmkorff. A chaque production de courant secondaire, l'électricité développée dans ce fil induit porte les deux moitiés du vibrateur à des potentiels différents et fait jaillir entre les deux boutons une étincelle, à travers laquelle se fait la décharge oscillante du vibrateur. Ces étincelles doivent se succéder très rapidement.

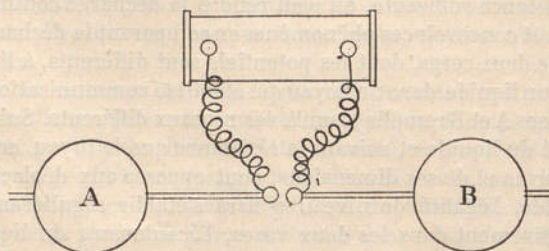


Fig. 446. — Expériences de Hertz.

Les oscillations ainsi obtenues, et dont le nombre varie de 1 à 30 billions par seconde suivant les dimensions de l'appareil, exercent une puissante action à distance, car, lorsque le vibrateur fonctionne bien, on peut tirer des étincelles de tous les corps métalliques situés même assez loin de l'appareil, que ces corps soient isolés ou reliés au sol.

Pour étudier la propagation de ces *oscillations électriques* dans le milieu ambiant, Hertz se sert d'un appareil qui a reçu le nom de *résonateur* à cause de son analogie d'action avec les résonateurs employés en Acoustique. Ce résonateur, qui peut d'ailleurs avoir des formes diverses, est généralement constitué par un fil métallique contourné en forme de circonférence et dont les deux extrémités, placées à une distance que l'on peut faire varier à volonté à l'aide d'une vis micrométrique, sont terminées l'une par une boule, l'autre par une pointe. Si l'on dispose ce résonateur dans le voisinage du vibrateur, on voit jaillir sans interruption, entre la pointe et la boule, des étincelles dont la longueur dépend des dimensions du résonateur, de même que l'intensité du renforcement produit par un résonateur acoustique, dépend, pour une hauteur de son donnée, des dimensions de ce résonateur ; par suite, lorsque la lon-

gueur de l'étincelle est maxima, c'est que la longueur du fil est celle que parcourt l'onde électrique pendant la durée d'une vibration simple ⁽¹⁾.

A l'aide de résonateurs, Hertz a reconnu que l'onde électrique partie du vibreur n'est point arrêtée par les corps isolants, tel qu'un mur en pierre par exemple. Au contraire, un corps métallique forme un écran plus ou moins parfait, suivant qu'il est plus ou moins épais; il existe alors derrière le corps une sorte d'ombre électrique qui permet de constater la propagation rectiligne des ondes électriques engendrées par le vibreur.

Ces ondes se réfléchissent sur un mur métallique, et lorsque le mur est parallèle au vibreur on peut constater la présence de nœuds et de ventres dus à l'interférence des ondes directes venue du vibreur et des ondes réfléchies par l'écran métallique. La distance de ces nœuds et de ces ventres a permis de calculer la longueur d'onde du mouvement vibratoire électrique; comme d'autre part, le nombre d'oscillations de la décharge, et par suite la durée des vibrations qui en résultent, ont pu être déterminés par des considérations qui ne peuvent trouver place ici, on a eu tous les éléments nécessaires au calcul de la vitesse de propagation de l'onde électrique dans l'air; cette vitesse a été trouvée égale à celle de la lumière.

En modifiant les dimensions des résonateurs, Sarrazin et de la Rive ont montré que la longueur des ondes électriques dépend beaucoup plus de ces dimensions que de celles du vibreur. Celui-ci émet-il des ondes complexes et le *résonateur* ne donne-t-il d'étincelles que sous l'influence des ondes qui correspondent à ses dimensions propres, ou l'onde est-elle simple, et les faits observés sont-ils dus à ce que l'amplitude des oscillations n'est pas constante? La question n'est point tranchée.

En faisant réfléchir les ondes électriques sur des miroirs métalliques paraboliques, Hertz a pu étudier les lois de la réflexion de ces ondes, lois qui ont été trouvées identiques à celles de la lumière; le passage de ces ondes à travers des prismes d'asphalte a de même montré à Hertz qu'elles se réfractaient suivant les mêmes lois que les ondes lumineuses.

Enfin, un réseau de fils de cuivre tendus parallèlement sur un

(1) En réalité le résonateur est soumis de la part du vibreur à deux sortes d'actions, une action électrostatique et une action électromagnétique; mais nous ne pouvons faire ici une étude complète du phénomène.

écran a, sur les vibrations électriques, la même action qu'un nicol ou une tourmaline sur des vibrations lumineuses polarisées rectilignement. Un tel écran, interposé sur le trajet du faisceau réfléchi par le miroir parabolique, arrête en effet ou laisse passer les ondes électriques, suivant que les fils sont perpendiculaires ou parallèles à l'axe du vibreur, axe suivant lequel s'effectuent les vibrations.

Hertz a montré encore que, si l'on dispose en face du vibreur une plaque métallique au centre de laquelle est fixé normalement un fil, ce fil est parcouru par des ondes qui se réfléchissent à son extrémité et forment, en interférant avec les ondes directes, des ventres et des nœuds fixes. En déterminant, avec un résonateur, la position de ces ventres et de ces nœuds on trouve que cette position est indépendante de la nature du fil et que la distance de deux nœuds consécutifs est la même que si la propagation des ondes s'effectuait, non dans le fil, mais dans l'air qui l'entoure. Il y a donc lieu de penser que les ondes électriques se propagent dans la couche d'air qui entoure les conducteurs et cette manière de voir est vérifiée par diverses expériences.

Lodge, puis Righi, sont parvenus, en répétant les expériences de Hertz, à augmenter le nombre des oscillations par seconde et par suite à réduire la longueur d'onde, ce qui est avantageux pour l'étude des lois de la réflexion, etc. Plus récemment, Lebedew, en réalisant des longueurs d'onde de 6 millimètres seulement, a pu constater facilement la réflexion, la réfraction, la double réfraction (à l'aide du soufre rhombique), la polarisation, l'interférence, etc., des ondes électriques. Enfin Bose a montré que les ondes électriques séparées par leur passage à travers un cristal biréfringent sont polarisées à angle droit, et que les diélectriques deviennent biréfringent pour les ondes électriques sous l'influence de dilations inégales dues à la chaleur ou de compressions mécaniques. Ce dernier fait est à rapprocher de ce que nous avons déjà dit (§ 582) de l'action sur la lumière polarisée du verre trempé ou comprimé.

724. **Expériences de d'Arsonval et de Tesla.** — Ces expériences, qui sont basées encore sur le caractère oscillatoire des décharges, sont relatives aux effets physiologiques et lumineux des courants alternatifs de grande fréquence. C'est d'Arsonval qui a le premier imaginé des dispositifs et institué des expériences pour étudier l'action physiologique de la fréquence des courants alternatifs. Tesla a eu plus spécialement pour objectif les effets physiques de ces mêmes courants.

On obtient des courants alternatifs de grande fréquence et de haute tension par le dispositif suivant.

Un courant alternatif de faible fréquence, fourni par une machine d'induction, est lancé dans le circuit primaire I (fig. 447) d'un transformateur Tr, tandis que le circuit secondaire de ce même

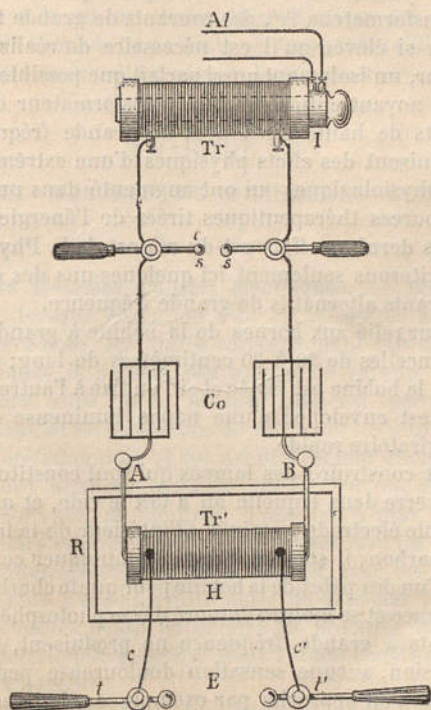


Fig. 447. — Appareil de Tesla pour la production de courants de grande fréquence et de haute tension.

transformateur est relié aux deux boules *ss* d'un exciteur *e* et aux armatures intérieures de deux condensateurs *Co*, dont les armatures extérieures communiquent avec le fil inducteur d'un second transformateur *Tr'*.

Le courant induit du premier transformateur provoque, entre les boules *ss* de l'exciteur *e*, un arc que l'on brise par l'action d'un

puissant électro-aimant ou d'une soufflerie; on obtient ainsi une décharge oscillante à très courte période; le phénomène est d'ailleurs continu, car les condensateurs se rechargent pendant l'interruption de l'arc et se déchargent à travers le circuit primaire du second transformateur Tr' pendant que l'arc jaillit. Les rapides oscillations de ces décharges successives provoquent, dans le circuit induit du transformateur Tr' , des courants de grande fréquence et d'une tension si élevée qu'il est nécessaire de réaliser, pour ce transformateur, un isolement aussi parfait que possible. On obtient ce résultat en noyant entièrement ce transformateur dans l'huile.

Les courants de haute tension et de grande fréquence, ainsi obtenus, produisent des effets physiques d'une extrême puissance et des effets physiologiques qui ont augmenté dans une large mesure les ressources thérapeutiques tirées de l'énergie électrique. L'étude de ces derniers effets est du ressort de la Physique biologique; nous citerons seulement ici quelques-uns des effets physiques des courants alternatifs de grande fréquence.

Un excitateur relié aux bornes de la bobine à grande fréquence donne des étincelles de 20 à 30 centimètres de long; si l'une des extrémités de la bobine est isolée et si l'on fixe à l'autre un fil court et fin, ce fil est enveloppé d'une nappé lumineuse et prend un mouvement giratoire rapide.

Tesla a fait construire des lampes qui sont constituées par une ampoule en verre dans laquelle on a fait le vide, et qui sont munies d'une seule électrode terminée à l'intérieur de la lampe par un bouton de charbon; il suffit de faire communiquer cette électrode unique avec l'un des pôles de la bobine pour que le charbon soit porté à l'incandescence et se montre entouré d'une photosphère éclatante.

Ces courants à grande fréquence ne produisent, malgré leur excessive tension, aucune sensation douloureuse perceptible sur l'organisme. Si l'on approche par exemple de l'un des pôles de la bobine Tr' une plaque métallique tenue à la main, une longue étincelle jaillit entre la plaque et le pôle, sans que l'observateur reçoive la moindre secousse. La plaque métallique est d'ailleurs uniquement destinée à protéger la main contre la brûlure que produirait l'étincelle si on la recevait directement.

Une lampe à incandescence, intercalée entre deux observateurs dont l'un, isolé, est relié à l'un des pôles de la bobine, s'illumine sans que les observateurs éprouvent de sensation désagréable. Lorsque chacun des observateurs est relié à l'un des pôles de la bobine,

on peut intercaler entre eux plusieurs lampes qui toutes s'illuminent. Si un observateur, relié à l'un des pôles de la bobine, tient à la main un tube de Tesla, tube droit sans électrodes dans lequel on a fait un vide presque parfait, le tube s'illumine brillamment.

En reliant l'un des pôles de la bobine à une grande surface métallique, placée horizontalement au-dessus du sol, on crée entre cette surface et le sol, un champ électrostatique tel que les tubes de Geissler, de Crookes ou de Tesla qu'on y place, s'illuminent sans être mis en communication, ni avec la bobine ni avec la plaque.

CHAPITRE XII

UNITÉS ET MESURES DE GRANDEURS ÉLECTRIQUES

A. — UNITÉS.

725. **Divers systèmes d'unités électriques.** — Bien que nous ayons défini, lorsque l'occasion s'en est présentée aux cours des Chapitres précédents, les unités correspondant aux diverses grandeurs électriques, il ne sera pas inutile de revenir sur ce sujet. Nous pourrions ainsi mieux préciser quel est, parmi les divers moyens qu'avaient les physiciens de rattacher les unités électriques aux unités fondamentales (§ 40) arbitrairement choisies, celui auquel un accord unanime (*Congrès des Electriciens*, Paris, 1881) a donné la préférence, et montrer, d'une façon plus explicite que par des notions éparses dans divers Chapitres, les relations directes des unités électriques entre elles et avec les unités fondamentales. Il était d'ailleurs utile aussi de rappeler les définitions des diverses unités avant de décrire les procédés de mesure des grandeurs électriques, procédés dont l'étude constitue la majeure partie de ce Chapitre.

Les principales grandeurs électriques et magnétiques à mesurer sont la *quantité d'électricité*, l'*intensité de courant*, la *résistance*, la *force électromotrice*, la *capacité* et la *quantité de magnétisme*.

Nous avons vu qu'il existe entre ces quantités des relations fondamentales qui peuvent s'exprimer par les formules :

$$q = It \quad (1)$$

$$W = qE = I^2Rt \text{ (loi de Joule)} \quad (2)$$

$$I = \frac{E}{R} \text{ (loi d'Ohm)} \quad (3)$$

$$C = \frac{q}{E} \quad (1)$$

$$= \frac{mI\sigma}{r^2} \quad (3)$$

On a donc 5 relations entre 6 quantités, q , I , E , R , C , m et il suffira de choisir arbitrairement l'une de ces six quantités pour que les cinq autres soient définies par les formules (1) à (5).

Si, d'ailleurs, l'on remarque que W représente une quantité de travail, f une force, σ et r des longueurs, on conçoit que l'on puisse rattacher les grandeurs électriques aux unités fondamentales.

Pour cela, il suffira d'exprimer en unités fondamentales, soit la quantité d'électricité, soit l'intensité de courant; de là deux systèmes d'unités électriques auxquels on a donné les noms, parfaitement justifiés comme on va le voir, de *système électrostatique* et de *système électromagnétique*.

Système électrostatique. — L'unité directement rattachée, dans ce système, aux unités fondamentales, est la quantité d'électricité.

La formule $f = \frac{qq'}{d^2}$ a été établie en prenant pour unité arbitraire de quantité d'électricité celle qui, agissant sur une quantité égale, placée à l'unité de distance, la repousse avec une force égale à l'unité de force.

Si l'on prend le centimètre et la dyne pour unités de longueur et de force, la valeur correspondante de q , tirée de la formule

$$f = \frac{q^2}{d^2},$$

sera l'unité électrostatique de quantité d'électricité.

L'unité de quantité étant définie comme nous venons de le dire, les autres unités le seront par les relations fondamentales rappelées ci-dessus; nous ne reviendrons pas sur ces définitions que nous avons déjà données à propos de chaque unité.

726. Système électromagnétique. — C'est le système qui a été définitivement adopté par le Congrès international des électriciens réuni à Paris en 1881.

L'unité directement liée aux unités fondamentales est l'unité

(1) Nous avons vu (§ 623) que $C = \frac{q}{V}$; mais les forces électromotrices étant mesurées par la différence de potentiel à laquelle elles sont dues, on peut écrire $C = \frac{q}{E}$.

de quantité de magnétisme. Or, pour établir la formule $f = \frac{mm'}{r^2}$, nous avons arbitrairement pris pour unité de quantité de magnétisme celle qui, agissant sur une quantité égale placée à l'unité de distance, la repousse avec une force égale à l'unité de force.

En prenant le centimètre pour unité de longueur et la dyne pour unité de force, la valeur correspondante de m , déduite de la formule $f = \frac{m^2}{d^2}$, est l'unité électromagnétique de quantité de magnétisme.

Les formules (1) à (5) permettront alors de définir les diverses unités dans ce nouveau système. Nous donnons ici les définitions auxquelles on est ainsi conduit pour ces unités.

Unité d'intensité. — La formule $f = \frac{m I \sigma}{r^2}$, d'où l'on tire :

$$I = \frac{f r^2}{m \sigma},$$

conduit, pour $f = 1$, $r = 1$, $m = 1$ et $\sigma = 1$, à la définition suivante.

L'unité d'intensité est celle d'un courant qui, traversant un élément de circuit long d'un centimètre ($\sigma = 1$), courbé en arc de cercle de 1 centimètre de rayon ($r = 1$), exerce une force d'une dyne ($f = 1$) sur une masse égale à l'unité ($m = 1$) et placée au centre du cercle.

Unité de quantité d'électricité. — Cette unité, déduite de la formule $q = It$, dans laquelle on fait $I = 1$ et $t = 1$ est la quantité qui est fournie en une seconde ($t = 1$) par un courant d'intensité unité ($I = 1$).

Unité de résistance. — En faisant $I = 1$, $t = 1$ et $W = 1$ dans la formule $W = I^2 R t$, on voit que l'unité de résistance est la résistance d'un circuit dans lequel le passage d'un courant d'intensité unité ($I = 1$) développe le travail d'un erg ($W = 1$) par seconde ($t = 1$).

Unité de force électromotrice ou de différence de potentiel. — La formule $I = \frac{E}{R}$ montre, lorsqu'on y fait $I = 1$ et $R = 1$, que la force électromotrice unité est celle que fournit un courant d'intensité unité ($I = 1$) dans un circuit de résistance égale à l'unité ($R = 1$).

Unité de capacité. — Si l'on fait $q = 1$ et $E = 1$ dans la formule $C = \frac{q}{E}$, on voit que la capacité unité est celle d'un condensateur qui, chargé de l'unité de quantité d'électricité ($q = 1$) présente sur ses armatures une différence de potentiel égale à l'unité ($E = 1$).

727. **Unités pratiques.** — Les unités que nous venons de définir sont trop grandes ou trop petites pour les grandeurs que l'on a à mesurer dans la pratique ; aussi a-t-on adopté un système d'*unités pratiques* constitué par des multiples ou des sous-multiples convenablement choisis des *unités théoriques* C.G.S.

L'unité pratique de résistance, qui a reçu le nom d'*ohm*, est égale à 10^9 unités électromagnétiques C.G.S. et à $10^9 \times a^2$ unités électrostatiques C.G.S., a étant une constante dont nous donnerons plus loin la valeur.

L'unité pratique de force électromotrice, à laquelle on a donné le nom de *volt*, est égale à 10^8 unités électromagnétiques C.G.S., et à $10^8 \times a$ unités électrostatiques C.G.S.

L'unité pratique d'intensité, appelée *ampère*, est l'intensité du courant produit dans un circuit ayant une résistance égale à 1 ohm par une force électromotrice de 1 volt ; l'ampère est égal à 10^{-1} unités électromagnétiques C.G.S., et à $10^{-1} \times a$ unités électrostatiques C.G.S.

L'unité pratique de quantité est la quantité qui traverse en seconde la section d'un conducteur parcouru par un courant de 1 ampère. Cette unité est égale à 10^{-1} unités électromagnétiques C.G.S. et à $10^{-1} \times a$ unités électrostatiques ; on lui a donné le nom de *coulomb*.

La capacité prise pour unité pratique de capacité, et appelée *farad*, est égale à 10^{-9} unités électromagnétiques C.G.S., et à $10^{-9} \times a^2$ unités électrostatiques C. G. S. ; c'est celle d'un condensateur qui, ayant reçu une charge de 1 coulomb, présente à ses deux armatures une différence de potentiel de 1 volt.

Les préfixes *méga* et *micro* sont employés pour désigner un million ou un millionième de ces unités pratiques. Un *mégohm* par exemple vaut 10^6 ohms et un *microfarad* 10^{-6} farads.

728. **Rapport des unités électrostatiques et électromagnétiques.** — Le rapport des diverses unités dans les deux systèmes est égal, comme nous venons de le voir, à une constante a ou au carré a^2 de cette constante. Le nombre a a été trouvé égal à la vitesse de propagation de la lumière. Il y a là sans doute plus qu'une coïncidence fortuite et l'on peut y voir un fait nouveau à l'appui de la théorie par laquelle Maxwell, en donnant aux phénomènes électriques et lumineux un substratum commun constitué par le milieu unique dans lequel ils prendraient naissance, a prévu implicitement, sauf à trouver des explications précises dans

chaque cas particulier, les relations qui peuvent exister entre ces deux catégories de phénomènes.

729. **Dimensions des unités.** — On appelle *équations de dimension* les relations qui existent entre chaque unité dérivée et les unités fondamentales arbitrairement choisies, centimètre, gramme, seconde. Ces relations indiquent suivant quelle loi chaque unité dérivée varie par rapport à chacune des unités fondamentales qui entrent dans l'équation de dimension.

On établit les équations de dimension ainsi qu'il suit.

Représentons d'une manière générale par L, M, T, les unités de longueur, de masse et de temps.

L'unité de volume V_0 , par exemple, sera donné par L^3 et l'on peut donc écrire l'équation de dimension :

$$V_0 = L^3,$$

qui montre que la grandeur V_0 de l'unité de volume varie en raison directe du cube de la grandeur L de l'unité de longueur. L'expression L^3 est la *dimension* de l'unité de volume.

La formule du mouvement uniforme $e = vt$ donne :

$$v = \frac{e}{t}$$

relation qui conduit à :

$$\text{unité de vitesse ou } V = \frac{\text{unité d'espace ou } L}{\text{unité de temps ou } T}$$

Cette équation de dimension $V = \frac{L}{T} = LT^{-1}$ montre que l'unité de vitesse V varie en raison directe de l'unité de longueur et en raison inverse de l'unité de temps.

La formule de l'accélération du mouvement uniformément varié

$g = \frac{2e}{t^2}$ conduit de même à l'équation de dimension :

$$G = \frac{2L}{T^2}.$$

Comme d'ailleurs la considération des dimensions des diverses unités est destinée ainsi que nous l'avons dit, à montrer suivant quelle loi chacune des unités dérivées varie lorsqu'on change la grandeur des unités fondamentales, et que ces lois ne sont pas in-

fluencées par la suppression de facteurs numériques, on convient de supprimer ces facteurs dans les équations de dimension. D'après cela, l'équation de dimension de l'accélération devient :

$$G = \frac{L}{T^2} = LT^{-2}.$$

La formule $f = mg$ donne de même pour équation de dimension de la force, si l'on remplace g par sa dimension trouvée ci-dessus :

$$F = MLT^{-2}.$$

De même encore, un travail étant égal au produit de la force qui l'effectue par le chemin parcouru suivant la direction de cette force, l'équation de dimension du travail sera :

$$Tr = MLT^{-2} \times L = ML^2T^{-2}.$$

Les équations de dimension des unités électriques sont tout aussi faciles à établir.

La formule $f = \frac{mm'}{r^2}$, par exemple, donne, pour $m = m'$:

$$m = r\sqrt{f};$$

l'équation de dimension de la quantité de magnétisme sera donc, puisque r est une longueur,

$$\text{Mag.} = L\sqrt{MLT^{-2}} = \sqrt{ML^3T^{-2}} = M^{\frac{1}{2}}L^{\frac{3}{2}}T^{-1}.$$

Cette relation indique que la grandeur de l'unité de quantité de magnétisme est proportionnelle à la puissance $\frac{1}{2}$ de la grandeur de l'unité de masse M , à la puissance $\frac{3}{2}$ de la grandeur de l'unité de longueur L et inversement proportionnelle à la grandeur de l'unité de temps T .

On trouverait de même que les équations de dimension sont :

Pour l'intensité du courant $I = M^{\frac{1}{2}}L^{\frac{1}{2}}T^{-1}$

Pour la force électromotrice $E = M^{\frac{1}{2}}L^{\frac{3}{2}}T^{-2}$

Pour la résistance $R = LT^{-1}$.

Pour la quantité d'électricité $Q = M^{\frac{1}{2}}L^{\frac{1}{2}}$

Pour la capacité $C = L^{-1}T^2$

Les dimensions des diverses unités sont différentes des expressions précédentes dans le système électrostatique.

B. — MESURES.

I. — Mesure des intensités.

730. **Procédés divers de mesure.** — Toutes les actions produites par les courants peuvent servir à mesurer leur intensité, pourvu que ces actions soient elles-mêmes mesurables. On utilise généralement pour la mesure de l'intensité, soit les décompositions chimiques produites par les courants, soit l'action des courants sur les aimants ou sur les courants; de là trois classes d'instruments de mesure, les voltamètres, les boussoles et galvanomètres divers et les électrodynamomètres.

731. **Mesure de l'intensité par les actions chimiques. Voltamètres.** — Cette méthode de mesure repose sur la loi de Faraday (§ 657) d'après laquelle *la quantité d'un électrolyte décomposée par un courant est proportionnelle à la quantité q d'électricité qui a traversé cet électrolyte.*

Nous avons vu que l'intensité vraie d'un courant, ou son intensité moyenne s'il n'est pas constant, était donnée par la formule :

$$I = \frac{q}{t},$$

dans laquelle q représente la quantité d'électricité qui a traversé une section quelconque du circuit pendant le temps t . D'après la loi rappelée ci-dessus, il suffira donc, pour mesurer l'intensité I , de déterminer le poids P d'électrolyte décomposé dans un temps T par le courant à mesurer. Si l'on désigne par p le poids de cet électrolyte décomposé par un courant d'un ampère en une seconde, poids qui peut être déterminé une fois pour toutes par un autre procédé, on aura :

$$I = \frac{P}{T} \times \frac{1}{p}, \quad (1)$$

formule qui donnera l'intensité en ampères, si T est exprimé en secondes.

Un courant d'un ampère met en liberté, en 1 seconde, 0^m01033 d'hydrogène; ce même courant, d'après la troisième loi de Fa-

raday (§ 657), mettra en liberté $0^{mg}.01035 \times e$ d'un autre corps, si l'on désigne par e l'équivalent chimique de ce corps ; l'intensité cherchée sera dès lors donnée en ampères par la formule :

$$I = \frac{P}{T \times 0,01035 \times e} \quad (2)$$

P étant exprimé en milligrammes et T en secondes.

La mesure de P s'effectue d'ailleurs à l'aide d'un voltamètre.

Le voltamètre à eau est, pour ces mesures, un appareil peu précis à cause de l'absorption des gaz par les électrodes, de la dissolution des gaz dans l'eau, des réactions secondaires (formation d'eau oxygénée, d'ozone) qui peuvent prendre naissance, etc., etc.

On préfère généralement utiliser l'électrolyse d'un sel métallique et peser le métal déposé sur l'électrode négative. Les solutions les plus employées sont le sulfate de cuivre et l'azotate d'argent ; cette dernière solution est préférable, car le cuivre peut s'oxyder si l'on ne prend diverses précautions pour le sécher avant la pesée. Les électrodes doivent être constituées par des lames de platine ou mieux par des lames du métal qui entre dans la solution. La technique est des plus simples, on pèse l'électrode négative, on la plonge dans l'électrolyte et l'on fait passer le courant pendant un temps T que l'on mesure ; on retire alors l'électrode négative, on la sèche, on la repèse, et la différence de poids donne la valeur de P qu'il suffit de porter, en même temps que celle de T et de l'équivalent e du métal déposé, dans la formule (2) pour avoir l'intensité cherchée.

732. **Mesure électromagnétique de l'intensité. Principe des boussoles et des galvanomètres.** — Cette méthode de mesure est basée sur l'action qu'un courant exerce sur un pôle magnétique et les instruments construits pour l'utilisation de cette méthode portent le nom de *boussoles*, de *galvanomètres*, d'*ampèremètres*.

Nous avons vu que l'action d'un courant sur un pôle magnétique est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelle à l'intensité du courant ; de là la possibilité, comme nous allons le montrer, de déduire cette intensité de la mesure de cette action.

Une aiguille aimantée, mobile autour d'un axe vertical, s'oriente dans le méridien magnétique sous l'action de la composante horizontale H de la force terrestre. Cette force peut toujours, en effet, être décomposée en une composante verticale, sans action possible sur l'aiguille mobile seulement dans un plan horizontal, et en une

composante horizontale qui sera seule efficace. Si l'on place dans le méridien magnétique, parallèlement à l'aiguille, un fil conducteur traversé par le courant, l'aiguille tendra, comme nous l'avons vu (§ 681), à se mettre en croix avec sa direction primitive. L'action du courant sur l'aiguille sera du reste augmentée si l'on enroule le fil conducteur sur un cadre disposé dans le méridien magnétique, de telle sorte que l'aiguille en occupe le centre. On voit en effet (fig. 448), en appliquant la règle d'Ampère, que les actions des diverses parties du cadre sur l'aiguille sont toutes concordantes, puisque la gauche du courant est, dans les diverses parties du cadre, du même côté par rapport au méridien dans lequel le cadre est placé.

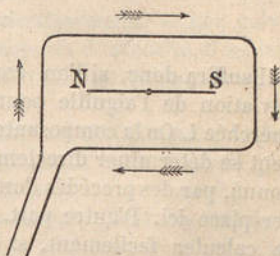


Fig. 448. — Principe des galvanomètres.

Si l'aiguille est suffisamment petite, condition qui doit toujours se trouver réalisée dans les galvanomètres et les boussoles, et si l'on s'arrange pour que les déplacements de l'aiguille soient toujours assez faibles, on peut admettre que le champ créé par le courant est uniforme dans la région où se produisent les déplacements de l'aiguille. L'intensité de ce champ, qui est proportionnelle à l'intensité I du courant qui l'engendre, sera donc représentée par GI en désignant par G une constante, dite *constante galvanométrique*, dont la valeur dépend des dimensions du cadre ainsi que du nombre de tours du fil, et qui représente l'intensité du champ produit par un courant d'intensité 1 dans l'appareil considéré.

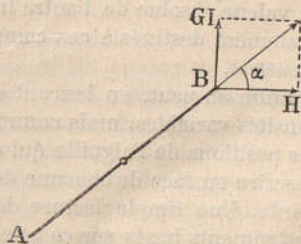


Fig. 449. — Direction de l'aiguille aimantée sous l'action du champ magnétique terrestre et du champ d'un courant.

La direction du champ dû au courant étant d'ailleurs perpendiculaire au champ terrestre, l'aiguille prendra, sous l'action de ces deux champs, une direction AB (fig. 449) faisant avec le méridien magnétique un angle α , tel que :

$$MH \sin \alpha = MGI \cos \alpha, \quad (1)$$

en désignant par M le moment magnétique de l'aiguille (§ 680) et par H la composante horizontale de la force terrestre. De (1) on tire :

$$I = \frac{H}{G} \operatorname{tg} \alpha. \quad (2)$$

Il suffira donc, si l'on connaît H et G , de mesurer l'angle α de déviation de l'aiguille pour déduire de la formule (2) l'intensité cherchée I . Or la composante horizontale du magnétisme terrestre peut se déterminer directement une fois pour toutes, en un lieu donné, par des procédés dont la description ne peut d'ailleurs trouver place ici. D'autre part, la constante galvanométrique G peut se calculer facilement, si le cadre sur lequel est enroulé le fil conducteur a une forme convenable ; tel est le cas des instruments qui ont reçu le nom de *boussoles* et qui permettent, grâce aux considérations qui précèdent, de mesurer l'intensité absolue d'un courant.

Le plus souvent on renonce à calculer G et l'on se contente de déduire du rapport des déviations de l'aiguille le rapport des intensités de deux courants à comparer ; si l'une de ces intensités a été déterminée en valeur absolue par un procédé quelconque, à l'aide d'une boussole par exemple, ce rapport fera alors connaître la valeur absolue de l'autre intensité. Les instruments plus spécialement destinés à ces comparaisons ont reçu le nom de *galvanomètres*.

Enfin on peut, en lançant dans l'instrument des courants d'intensités variables, mais connues, déterminer une fois pour toutes les positions de l'aiguille qui correspondent à chaque intensité et inscrire en face de chacune de ces positions l'intensité correspondante. Une simple lecture donne alors l'intensité cherchée. Les instruments basés sur ce principe ont reçu le nom d'*ampèremètres* ou de *milliampèremètres*, suivant l'unité adoptée pour leur graduation.

733. **Boussoles des tangentes.** — Le fil conducteur est enroulé sur un cadre circulaire dont le rayon est très grand par rapport aux dimensions de l'aiguille aimantée placée en son centre.

On démontre que, dans ce cas, la constante G est donnée par la formule :

$$G = n \frac{2\pi}{r},$$

en désignant par n le nombre des spires du fil et par r leur rayon. L'angle α qui entre dans la formule (2), d'où l'on déduit l'intensité du courant, se mesure par la méthode de Poggendorff, grâce à un petit miroir dont l'aiguille est munie.

734. Galvanomètres. Sensibilité. Amortissement. — Les galvanomètres ne devant fournir que des rapports d'intensité, il est inutile de donner au cadre une forme telle que la valeur de G soit facile à calculer.

En ce qui concerne la sensibilité de ces instruments, la formule (2) (§ 732) montre que cette sensibilité sera d'autant plus grande que G sera plus grand et H plus petit.

Pour augmenter la valeur de G , on enroule plusieurs fois le fil sur un cadre au centre duquel est placée l'aiguille.

Il y a, à ce point de vue, avantage à donner au fil du galvanomètre une grande longueur, afin qu'il puisse faire un grand nombre de tours sur le cadre, et une faible section pour que les diverses couches soient moins éloignées de l'aiguille. Il faut remarquer toutefois que l'introduction d'un galvanomètre, dans le circuit traversé par le courant dont on veut mesurer l'intensité, augmente la résistance de ce circuit et diminue par suite l'intensité du courant à mesurer dans une proportion d'autant plus grande que le fil du galvanomètre est plus long et plus fin, ce qui rend l'instrument en quelque sorte moins sensible.

On démontre que le galvanomètre atteint sa sensibilité maxima lorsque le rapport de l'épaisseur du fil, y compris la couche isolante qui le recouvre, à l'épaisseur du fil nu est égal au rapport de la résistance extérieure au galvanomètre à la résistance propre de l'instrument. Si l'on suppose négligeable l'épaisseur de la couche isolante, il faut, pour que la sensibilité soit maxima, que la résistance du galvanomètre soit égale à celle du circuit extérieur. Lorsque ce circuit extérieur est peu résistant, lorsqu'on mesure par exemple l'intensité du courant fourni par une pile thermo-électrique, il faut donc employer un galvanomètre à faible résistance, constitué par conséquent par un fil gros et court. On devra au contraire faire usage d'un galvanomètre à fil fin enroulé un grand nombre de fois sur le cadre et présentant par suite une grande résistance, dans le cas où la résistance du circuit extérieur est très grande, lorsque l'on veut par exemple mesurer l'intensité du courant qui, dans un muscle vivant, va du centre à la périphérie.

On augmente encore la sensibilité des galvanomètres en dimi-

nuant la valeur de H ; on obtient facilement ce résultat, soit en plaçant au-dessus de l'aiguille aimantée, sur une tige qui surmonte le cadre, un aimant que l'on peut orienter de telle sorte qu'il donne naissance, dans la région où se trouve l'aiguille, à un champ sensiblement uniforme et de sens contraire au champ terrestre, soit

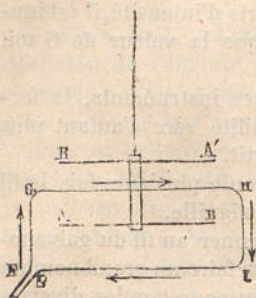


Fig. 450. — Système astatique.

en employant un système d'aiguilles *astatiques* (fig. 450). Ce système est constitué par deux aiguilles aimantées parallèles AB , $A'B'$, fixées invariablement l'une au-dessus de l'autre de manière que leurs pôles de noms contraires soient en regard. Si les deux aiguilles ont même moment magnétique, l'action de la terre sur un tel système est nulle et ce système, suspendu par un fil de cocon, resterait indifféremment en équilibre dans les divers plans où l'on pourrait l'amener, si l'effet de la torsion du fil de suspension n'existait pas. Lorsqu'on fait ainsi usage d'un système astatique, il est nécessaire, pour ne pas rendre nulle l'action totale du courant sur ce système, soit de placer l'une des aiguilles seulement à l'intérieur du cadre, soit d'entourer chaque aiguille d'un cadre sur lequel le fil s'enroule en sens inverse; dans ce dernier cas les actions des deux cadres sur chacune des deux aiguilles orientées en sens inverse tendent à produire, pour chacune d'elles, des déviations de même sens.

Quand on lance un courant dans un galvanomètre sensible, l'aiguille oscille généralement longtemps avant de se fixer dans sa position d'équilibre et il en est de même lorsqu'on interrompt le courant; ces oscillations sont d'ailleurs très gênantes parce qu'elles allongent inutilement les déterminations. On diminue considérablement le nombre et la durée des oscillations d'une aiguille aimantée en la munissant de palettes légères en mica, véritables amortisseurs contre lesquels s'exerce la résistance de l'air. On arrive au même résultat en entourant l'aiguille aimantée d'une masse de cuivre; les mouvements de l'aiguille déterminent alors dans cette masse métallique des courants d'induction qui, en vertu de la loi de Lenz, s'opposent aux déplacements qui leur donnent naissance. Les galvanomètres dont l'aiguille s'immobilise rapidement dans sa position d'équilibre sont dits *apériodiques*. Il

importe de remarquer que l'apériodicité ne diminue en rien la sensibilité de l'instrument, c'est-à-dire la déviation finale de l'aiguille aimantée.

L'aiguille aimantée des galvanomètres de précision est munie d'un miroir destiné à la mesure des déviations par la méthode de Poggendorff.

735. **Shunt.** — Il peut arriver que l'intensité à mesurer soit supérieure aux indications que peut fournir le galvanomètre dont on dispose. On peut cependant se servir encore, dans ce cas, de l'instrument en le munissant d'un *shunt*.

Le principe du shunt est le suivant. Soit R la résistance du galvanomètre, mesurée comme il sera

dit plus bas, et $\frac{R}{9}$ la résistance d'un

fil A que l'on intercale entre les deux bornes de l'instrument, de telle sorte que le courant à mesurer, d'intensité I , se divise en

deux courants dérivés, l'un d'intensité i_1 qui passe dans le galvanomètre et l'autre d'intensité i_2 qui suit le fil A . D'après les formules du paragraphe 646, on aura :

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{\frac{R}{9}}{R} = \frac{1}{9}, \quad \text{d'où :} \quad i_2 = 9i_1;$$

comme d'ailleurs $I = i_1 + i_2$, on a :

$$I = i_1 + 9i_1 = 10i_1.$$

L'intensité i_1 du courant qui traverse le galvanomètre est donc, grâce au shunt, égale à $\frac{1}{10}$ seulement de celle du courant principal.

Si la résistance du fil A avait été égale à $\frac{R}{99}$, $\frac{R}{999}$, ..., l'intensité du courant à travers le galvanomètre eût été $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{1000}$, ... de celle du courant principal.

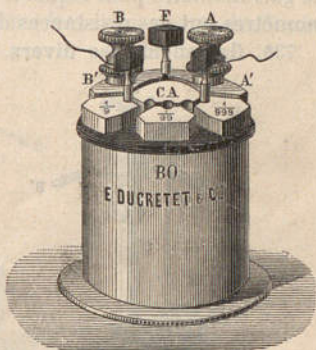


Fig. 451. — Shunt.

Un shunt (fig. 451) est la réunion de fils dont la résistance est égale à $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{99}$, $\frac{1}{999}$ de celle du galvanomètre. Ces fils sont contenus dans un cylindre, où ils sont noyés dans la paraffine, et les extrémités de chacun d'eux aboutissent à des bornes extérieures que l'on peut mettre en communication avec celles du galvanomètre.

Il résulte de ce qui précède qu'un shunt ne peut servir qu'avec le galvanomètre pour lequel il a été construit, car les divers galvanomètres ont des résistances différentes.

736. Galvanomètres divers. — *Galvanomètre ordinaire.* — Il est

constitué par un système astatique suspendu par un fil de cocon, de telle sorte que son aiguille inférieure soit placée à l'intérieur du cadre sur lequel est enroulé le fil conducteur, tandis que l'aiguille supérieure se déplace sur un cercle gradué.

Galvanomètre de Thomson.

— Ce galvanomètre est tantôt à une seule bobine, comme celui que représente la figure 452, tantôt à deux bobines, suivant qu'il est muni d'une seule aiguille ou d'un système astatique. L'aiguille, ou les aiguilles, sont constituées par un ou deux groupes de petits barreaux aimantés, suspendus par un fil sans torsion fixé par son extrémité supérieure au sommet S d'une colonne qui sert également à porter un aimant directeur. Cet aimant peut, grâce au pignon V et à la vis de serrage C, être placé dans telle

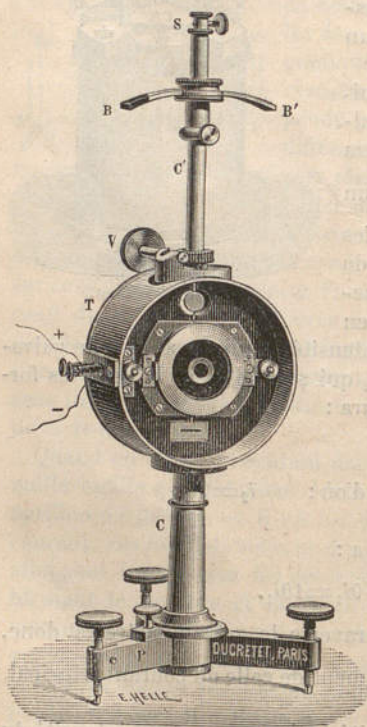


Fig. 452. — Galvanomètre de Thomson.

direction et à telle distance des aiguilles que l'on désire, ce qui permet de modifier à volonté la direction et l'intensité du champ

magnétique qui agit sur l'aiguille; on n'a donc pas à se préoccuper, comme avec les galvanomètres ordinaires, de placer le plan des spires du fil conducteur dans le méridien magnétique terrestre.

La lecture des déviations se fait grâce à un miroir collé sur l'une des aiguilles ou sur la tige qui les réunit.

L'amortissement est obtenu, dans le modèle à deux bobines, à l'aide d'une palette de mica.

Cet instrument est excessivement sensible.

Galvanomètre de Wiedemann. — Dans le galvanomètre de Wiede-

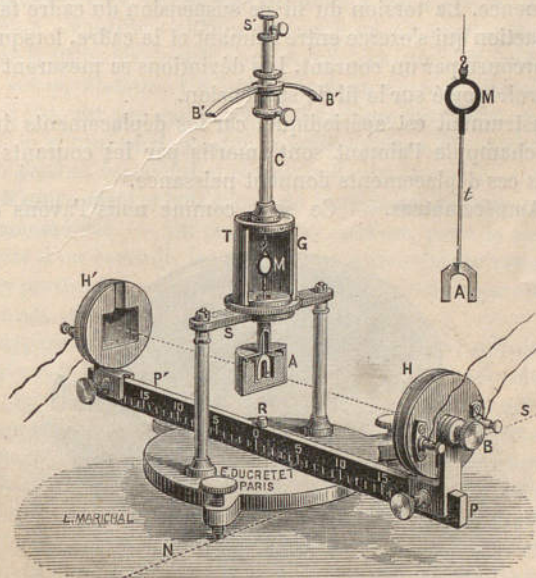


Fig. 453. — Galvanomètre de Wiedemann.

mann, modifié par d'Arsonval (fig. 453), l'aiguille aimantée A, en forme de fer à cheval, est suspendue à l'intérieur d'une masse de cuivre destinée à réaliser l'apériodicité. Un miroir M sert à la mesure de la déviation, et un aimant mobile B'B' permet de modifier à volonté le champ dans lequel l'aiguille est placée. Le courant passe dans deux bobines H et H' que l'on peut rapprocher plus ou moins de l'aiguille aimantée, de manière à faire varier la sensibilité de l'instrument. Avec deux couples de bobines, les unes à fil

fin, les autres à gros fil, ce galvanomètre peut être utilisé dans tous les cas.

Galvanomètre Desprez-d'Arsonval. — L'aiguille aimantée de ce galvanomètre est remplacée par un aimant fixe en fer à cheval; la partie mobile est alors constituée par le cadre destiné à l'enroulement du conducteur traversé par le courant. Ce cadre est suspendu entre les deux branches de l'aimant, et, pour augmenter l'intensité du champ magnétique dans lequel il se trouve placé, on a disposé, à l'intérieur, un cylindre de fer doux qui est fixe et qui s'aimante par influence. La torsion du fil de suspension du cadre fait équilibre à l'action qui s'exerce entre l'aimant et le cadre, lorsque celui-ci est parcouru par un courant. Les déviations se mesurent à l'aide d'un miroir porté sur le fil de suspension.

Cet instrument est apériodique, car les déplacements du cadre dans le champ de l'aimant sont amortis par les courants induits auxquels ces déplacements donnent naissance.

737. *Ampéremètres.* — Ce sont, comme nous l'avons dit, des

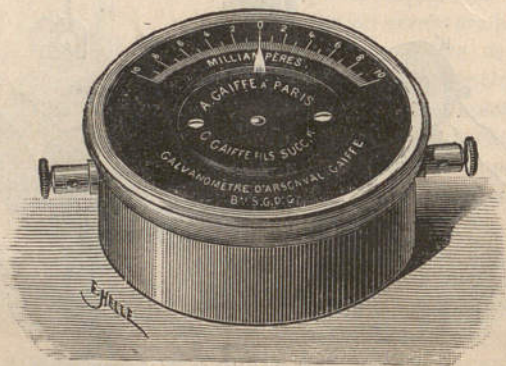


Fig. 454. — Milliampéremètres.

galvanomètres étalonnés; les uns, destinés à mesurer les courants intenses employés dans l'industrie, sont gradués en ampères; les autres, destinés à la mesure des courants plus faibles utilisés en Médecine, sont gradués en milliampères.

Les modèles d'ampéremètres sont fort nombreux; nous donnerons ici quelques détails sur ceux qui sont le plus fréquemment utilisés en Médecine.

Ces instruments peuvent être des galvanomètres ordinaires dont l'aiguille est munie d'un index qui se déplace sur une graduation circulaire; on donne en général au cadre multiplicateur une forme telle que les divisions correspondant à une même variation d'intensité soient sensiblement équidistantes dans les diverses parties de l'échelle. Les milliampèremètres peuvent également être construits sur le même principe que le galvanomètre Desprez-d'Arsonval; tel est le cas de l'ampèremètre d'Arsonval-Gaiffe qui est constitué par deux aimants circulaires entre lesquels se trouve le cadre mobile. Un ressort de forme spéciale tend à ramener ce cadre dans sa position d'équilibre chaque fois qu'il en est écarté; de plus les courants induits développés par les déplacements du cadre amortissent ses oscillations. Un index, dont on aperçoit l'extrémité sur la figure 454, est fixé sur le cadre et indique immédiatement, par sa position sur un cercle gradué en milliampères, l'intensité du courant qui produit la déviation correspondante du cadre.

738. **Mesure électrodynamique de l'intensité. Principe des électrodynamomètres.** — On peut encore utiliser, pour la mesure de l'intensité d'un courant, les actions qui peuvent s'exercer entre les diverses parties de ce courant. C'est sur ce principe que sont basés les *électrodynamomètres*.

Ces appareils sont constitués par deux bobines; ordinairement l'une de ces bobines est très longue et fixe, l'autre est courte, mobile et placée à l'intérieur de la première de manière que son axe soit perpendiculaire à celui de cette bobine fixe. Le courant à mesurer passe dans les deux bobines qui tendent alors à se placer parallèlement et qui exercent l'une sur l'autre des actions que l'expérience montre être *proportionnelles au carré de l'intensité du courant*. Des considérations sur lesquelles nous ne saurions insister ici permettent de déterminer, pour chaque instrument, la valeur du rapport de proportionnalité. On conçoit dès lors que l'on puisse déduire la valeur absolue de l'intensité à mesurer de la mesure de l'action électrodynamique entre les deux bobines.

Dans certains modèles appelés *électrodynamomètres-balances*, la bobine mobile est suspendue à l'extrémité d'un fléau de balance et l'on cherche les poids qu'il faut placer à l'autre extrémité de ce fléau pour maintenir la bobine dans sa position d'équilibre, lorsqu'un courant tend à l'en écarter.

Dans les électrodynamomètres usuels, la bobine mobile est suspendue par un fil sans torsion à l'intérieur de la bobine fixe et l'on

mesure, soit l'angle de torsion qu'il faut donner au fil pour ramener la bobine mobile à sa position d'équilibre, soit plus simplement la déviation de cette bobine au moment de la nouvelle position d'équilibre; l'instrument doit alors être gradué par comparaison.

Ces électrodynamomètres présentent l'avantage de permettre la mesure de l'intensité des courants alternatifs; l'action entre les deux bobines ne change pas de sens en effet, lorsque le sens du courant change, puisque celui-ci se renverse dans les deux bobines.

II. — Mesure des quantités d'électricité.

739. **Généralités.** — Nous avons vu comment on pouvait, avec le plan d'épreuve et la balance de Coulomb, mesurer directement la quantité d'électricité qui se trouve en un point d'un conducteur électrisé.

La quantité d'électricité q , qui a traversé dans un temps donné t un conducteur parcouru par un courant, se déduit, en général, de l'intensité I de ce courant par la formule :

$$q = It;$$

mais q peut aussi se mesurer directement.

740. **Méthode chimique.** — La méthode chimique, que nous avons exposée à propos de la mesure de l'intensité du courant, donne en réalité la quantité q d'électricité qui a traversé le conducteur et c'est de cette quantité q que l'on déduit, comme nous l'avons vu, la valeur de l'intensité.

741. **Méthode du galvanomètre balistique.** — On désigne ainsi un galvanomètre dans lequel les diverses causes d'amortissement des oscillations de l'équipage mobile sont soigneusement supprimées. Lorsqu'on décharge à travers un tel instrument une quantité q d'électricité en un temps très court par rapport à la durée d'une oscillation de l'équipage, le premier arc décrit par cet équipage, sous l'impulsion qui résulte du passage de l'électricité, permet de mesurer la quantité d'électricité mise en jeu. Si l'on se sert de ces galvanomètres pour comparer des quantités d'électricité, on peut admettre que, pour de faibles déviations de l'aiguille, les quantités d'électricité qui traversent le galvanomètre sont proportionnelles aux déviations qu'elles produisent.

742. **Compteurs d'électricité.** — La mesure de la quantité d'élec-

tricité est importante au point de vue industriel pour la mesure de la quantité consommée par des abonnés qui sont, par exemple, éclairés par le courant envoyé d'une usine. On a construit pour cela des compteurs d'électricité; il en existe un grand nombre de modèles, mais aucun n'est entièrement satisfaisant.

Certains compteurs sont basés sur des actions chimiques et la quantité d'électricité qui les a traversés se déduit du poids d'électrolyte décomposé; d'autres sont constitués par un ampèremètre combiné avec un mouvement d'horlogerie et sont disposés de façon à marquer, sur un enregistreur semblable à celui des compteurs à gaz, le nombre de coulombs ou de centaines de coulombs qui passent pendant chaque seconde; d'autres encore sont basés sur la différence de marche de deux pendules dont l'un est terminé par une lentille ordinaire en laiton, tandis que l'autre, terminé par un aimant, se meut au-dessus d'une bobine traversée par le courant à mesurer, etc.

III. — Mesure des résistances.

743. **Étalons et boîtes de résistances.** — On mesure une résistance en la comparant, à l'aide d'un courant, à une résistance connue; il est donc nécessaire, pour faire cette comparaison, de posséder des étalons de résistance.

Des déterminations sur lesquelles nous ne saurions insister ici ont permis d'établir que l'unité pratique de résistance, l'ohm, était la résistance d'une colonne de mercure à 0° qui aurait un millimètre carré de section et 106 centimètres de longueur. On construit de tels étalons en enfermant le mercure dans un tube de verre, bien calibré et de la longueur indiquée, aboutissant par ses deux extrémités à deux larges godets pleins de mercure; les masses mercurielles contenues dans ces godets peuvent être considérées comme de résistance nulle à cause de leur grande section. Le tube de verre peut être rectiligne ou recourbé.

Si le mercure est à t° , la résistance de l'étalon est donnée par la formule empirique :

$$R_t = R_0(1 + 0.0008649t + 0.00000142t^2).$$

Les étalons en mercure sont d'un maniement peu commode et l'on emploie dans la pratique des bobines dont le fil, en maillechort, est plié et enroulé deux fois en sens inverse sur le cylindre iso-

lant de la bobine, ce qui annule les phénomènes d'induction; les extrémités du fil sont reliées à des masses métalliques de résistance nulle. Ces bobines sont étalonnées à 0°; leur résistance à t° est donnée par la formule empirique :

$$R_t = R_0(1 + 0,00044t).$$

Les boîtes de résistance sont constituées par une série de telles bobines dont les résistances sont dans le même rapport que les valeurs des poids d'une boîte à poids :

1, 1, 2, 3, 10, 10, 20, 50, 100, 100, ohms.

Diverses dispositions sont employées pour permettre d'introduire à volonté dans le circuit telle résistance que l'on désire. L'une de

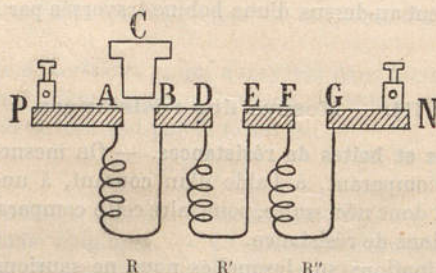


Fig. 455. — Boîte de résistance (figure schématique).

ces dispositions est représentée schématiquement sur la figure 455 et en coupe sur la figure 456.

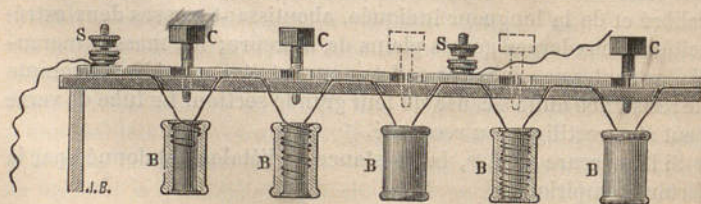


Fig. 456. — Boîte de résistance (coupe).

Les extrémités du fil de chaque bobine aboutissent à des masses métalliques distinctes PA, BD, EF... (fig. 455) et de section assez grande pour que leur résistance soit négligeable; la première masse

métallique et la dernière portent des bornes P et N destinées à recevoir les fils venus des pôles d'une pile. Si les masses sont isolées les unes des autres, le courant devra passer successivement à travers les résistances R, R', R"... Si, au contraire, on introduit dans l'intervalle AB une large cheville métallique, il n'y aura dans le fil R, d'après la loi des courants dérivés, qu'un courant d'intensité négligeable; en d'autres termes, le courant ira directement de A à B, et la résistance R sera supprimée. Suivant donc que l'on comblera, par des chevilles métalliques, un ou plusieurs des intervalles AB, DE, FG... on supprimera une ou plusieurs des résistances R, R', R"...

Les fils R, R', R"... sont contenus dans une caisse à l'intérieur de laquelle on a coulé de la paraffine, et les pièces métalliques PA, BD,... sont seules apparentes à l'extérieur.

Il existe plusieurs méthodes qui permettent de comparer deux résistances et par suite d'évaluer la valeur en ohms d'une résistance déterminée, lorsqu'on possède des résistances étalonnées.

744. Méthode par substitution. — Le corps A dont on veut déterminer la résistance est introduit dans un circuit qui comprend un galvanomètre et une pile constante, et l'on note l'intensité I du courant; on substitue alors au corps A une boîte de résistances et l'on détermine par tâtonnements la résistance R pour laquelle le galvanomètre accuse un courant d'intensité I. La loi de Ohm, appliquée dans les deux cas, montre que la résistance R est égale à celle du corps A si la force électromotrice de la pile est, comme nous le supposons, restée la même pour les deux déterminations.

745. Méthode du pont de Wheatstone. — Le courant d'une pile est bifurqué entre deux points A et B (fig. 457), et deux points C et D des deux parties ACB, ADB sont réunis par un pont conducteur sur le trajet duquel on place un galvanomètre G. En cherchant la condition à laquelle doivent satisfaire les résistances a, x, b, r , des quatre parties AC, AD, CB, DB du circuit qui constituent les quatre branches du pont, pour que le galvanomètre G n'indique le passage d'aucun courant, c'est-à-dire pour que les deux points C et D soient au même potentiel, on établit, comme on va le voir, entre a, x, b, r une relation qui permet de calculer x lorsque a, b et r sont connues.

Lorsqu'aucun courant ne passe en CD, l'intensité du courant devra avoir la même valeur i en AD et DB d'une part et la même valeur i' en AC et CB d'autre part. Si donc l'on désigne par V_A

et V_B les potentiels en A et en B et par V' la valeur commune du potentiel en C et en D, on aura, en supposant que le courant aille de A en B et en appliquant la loi de Ohm aux parties AD et DB :

$$\frac{V' - V_A}{x} = \frac{V_B - V'}{r}; \quad (1)$$

les parties AC et CB donnent de même :

$$\frac{V' - V_A}{a} = \frac{V_B - V'}{b}. \quad (2)$$

En divisant (1) et (2) membre à membre il vient :

$$\frac{a}{x} = \frac{b}{r}. \quad (3)$$

Cette relation permettra de déterminer la résistance x , si l'on connaît les trois autres, ou même si l'on connaît l'une de ces trois résistances a et le rapport $\frac{b}{r}$ des deux autres.

Le mode opératoire est le suivant. On place en x la résistance à mesurer, en b et r deux résistances connues ou de rapport connu, et en a une boîte de résistance, et l'on cherche par tâtonnements, en procédant comme pour une pesée, la valeur de la résistance a qu'il faut donner à la boîte pour que le pont CD ne soit traversé par aucun courant, c'est-à-dire pour que le galvanomètre reste au repos lorsque, au moyen d'une *clef de circuit*, on lance le courant de la pile dans les deux branches ADB et ACB du pont. La valeur de x se déduit alors de la formule (3) dans laquelle on remplace a , b et r par leurs valeurs.

La mesure des résistances des liquides présente quelques difficultés à cause de la polarisation des électrodes, du dégagement gazeux qui se fait à leur surface et du changement de concentration qui résulte du passage du courant lorsque le sel en dissolution n'est pas un sel du métal qui constitue les électrodes. Nous ne saurions insister ici sur les divers procédés qui permettent d'éviter plus ou moins complètement ces inconvénients et nous nous bornerons à indiquer les principaux résultats auxquels on est arrivé dans la mesure de ces résistances, ainsi que les principales applications qui ont été faites de la variation de la résistance d'un corps sous l'influence de causes diverses.

746. **Résultats et applications.** — Les métaux sont les corps qui

offrent le moins de résistance au passage d'un courant. La résistance des liquides est en général très considérable; celle des gaz est encore plus grande. Les liquides composés ne se laissent traverser par le courant qu'en se décomposant.

La résistance d'un même corps varie avec sa température. Le tableau suivant donne les valeurs à 0° et rapportées à celle de l'argent prise comme unité des *résistances* de quelques corps considérés sous une même longueur et une même section.

Argent.....	1.00	Mercure.....	61.35
Cuivre.....	1.00	Graphite.....	145.00
Or.....	1.28	Solution saturée	
Zinc.....	3.44	de NaCl.....	2 903 558.00
Laiton.....	5.00	Solution saturée	
Platine.....	5.55	de SO ⁴ Zn.....	15 861 267.00
Fer.....	5.95	Solution saturée	
Plomb.....	12.02	de SO ⁴ Cu.....	16 855 520.00

Les fils conducteurs sont généralement en cuivre, ou, pour une raison de prix de revient, en fer. Les oxydes de ces métaux étant beaucoup plus résistants que les métaux eux-mêmes, il est nécessaire de bien décaper les surfaces de contact au niveau des points de jonction de deux conducteurs, si l'on ne veut pas augmenter considérablement par un contact imparfait la résistance au passage du courant.

Il est en outre essentiel de bien serrer l'une contre l'autre les surfaces de contact; les variations de pression et d'étendue de ces surfaces peuvent en effet, surtout lorsque le corps n'est pas très conducteur, ce qui est le cas du charbon par exemple, produire des variations notables de la résistance et par suite de l'intensité du courant qui passe. C'est sur ce fait que sont basés les *microphones* (§ 708).

Certaines modifications dans la constitution physique (écrouissage, recuit, etc.) peuvent faire varier la résistance électrique d'un corps.

La résistance du sélénium à l'état cristallin augmente sous l'influence d'une élévation de température et diminue au contraire sous l'action des radiations plus réfrangibles que le rouge, ainsi que l'ont montré May et Smith. Cette propriété a été utilisée dans la construction d'un instrument imaginé par Bell et connu sous le nom de *photophone*. La partie essentielle du photophone est constituée par un récepteur en sélénium qui est intercalé dans le circuit d'une

pile et d'un téléphone, et sur lequel on fait tomber un faisceau lumineux intermittent. Les variations périodiques d'intensité du courant, qui sont la conséquence des variations périodiques de résistance engendrée par l'arrivée intermittente de la lumière, font naître, dans le téléphone auquel le sélénium est réuni, un son dont la hauteur dépend du nombre des intermittences lumineuses.

La variation de résistance des corps avec la température a été utilisée dans un appareil thermométrique d'une grande sensibilité, le *bolomètre* de Langley.

Le bolomètre est constitué par un pont de Wheatstone, dont

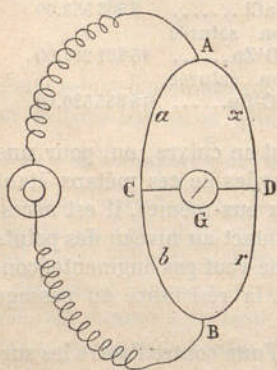


Fig. 437. — Mesure d'une résistance.
Méthode du pont de Wheatstone.

deux branches *b* et *r* (fig. 437) sont identiques entre elles et constituées par un métal quelconque, tandis que les deux autres *a* et *x*, identiques aussi, sont chacune formées d'un ruban de fer ou de platine très mince et très fin, replié plusieurs fois en zigzag; l'une de ces deux dernières branches, soumise seule à l'action des radiations, est recouverte de noir de fumée; l'autre est protégée par un écran. Lorsque les quatre branches sont à la même température et qu'un courant est lancé dans le pont, le galvanomètre n'accuse aucune déviation puisque la condi-

tion établie plus haut est satisfaite; mais toute variation de température du récepteur *x*, à laquelle ne participe point la branche d'équilibre *a*, se traduit par une variation de résistance de *x* et par une déviation de l'aiguille du galvanomètre. Tant que la variation de température est très faible, la déviation de l'aiguille peut être regardée comme proportionnelle à cette variation.

Le *bolomètre* de Langley, et le *radiomicromètre* de Boys qui est basé sur un autre principe (production d'un courant thermo-électrique), sont les thermomètres différentiels les plus sensibles que l'on connaisse aujourd'hui; ils permettent de révéler une variation de température du récepteur de un millionième de degré.

747. **Résistance d'un galvanomètre.** — Il existe divers procédés pour effectuer la mesure de cette résistance; nous nous bornerons

à donner celui de lord Kelvin qui repose sur l'emploi du pont de Wheatstone.

On dispose le galvanomètre G en x (fig. 437), à la place de la résistance à mesurer, et l'on intercale sur le pont CD , à la place du galvanomètre, une clef qui permet d'établir ou d'interrompre la communication entre les deux points C et D ; en fait alors varier la résistance a du bras AC du pont jusqu'à ce que la déviation du galvanomètre ne soit point modifiée lorsque l'on établit ou que l'on interrompt la communication entre C et D . On démontre que la résistance G du galvanomètre est alors donnée par la formule :

$$G = a \frac{r}{b}.$$

748. **Résistance d'une pile.** — On peut employer une méthode analogue à celle que nous venons de décrire pour la mesure de la résistance d'un galvanomètre; il suffit de mettre la pile en x (fig. 437) à la place du galvanomètre et le galvanomètre à la place de la pile. Lorsque la déviation du galvanomètre n'est pas influencée par la position de la clef, la résistance intérieure de la pile est donnée par la formule :

$$P = a \frac{r}{b}.$$

La résistance intérieure d'une pile varie avec la distance et la surface de ses deux électrodes, avec la nature et la concentration des liquides; elle est augmentée par la présence des gaz qui peuvent se dégager sur les électrodes. Cette résistance ne reste donc pas en général constante pendant toute la durée du fonctionnement de l'électromoteur.

IV. — Mesure des différences de potentiel et des forces électromotrices.

749. **Divers procédés de mesure.** — Les diverses méthodes employées pour mesurer la différence de potentiel entre deux points sont fort nombreuses; elles sont basées sur l'emploi d'électromètres ou de galvanomètres. Les électromètres sont seuls utilisables pour les mesures d'électricité statique, mais ils sont, comme les galvanomètres, applicables au cas où les deux points, entre lesquels on veut mesurer une différence de potentiel, font partie d'un

circuit traversé par un courant, ou constituent les deux pôles d'une pile.

La différence de potentiel qui existe entre les deux pôles d'une pile en circuit ouvert mesure la force électromotrice de la pile. La valeur de cette force électromotrice peut être déterminée par plusieurs méthodes spéciales ; nous exposerons seulement les principales.

750. Mesure des différences de potentiel par les électromètres.

— Nous avons déjà décrit l'électromètre à quadrans et l'électromètre de Lippmann et nous avons indiqué comment on peut, avec ces instruments, comparer entre elles deux différences de potentiel et par suite évaluer en volts une telle différence, grâce à une graduation préalable. Il existe d'ailleurs des électromètres *absolus* dans les détails desquels nous ne saurions entrer ici et qui permettent de déterminer directement la valeur en unités C. G. S. d'une différence de potentiel, au moyen de l'attraction qui s'exerce entre deux plateaux portés aux potentiels considérés.

751. Mesure des différences de potentiel par les galvanomètres étalonnés. Voltmètres. — Pour déterminer la différence de potentiel E de deux points A et B d'un circuit, on peut encore placer en dérivation entre ces deux points un galvanomètre étalonné. Ce galvanomètre fera connaître l'intensité I du courant qui le traverse et on aura, d'après la loi de Ohm :

$$I = \frac{e}{G}, \quad (1)$$

en désignant par G la résistance du galvanomètre et par e la différence de potentiel des deux points A et B après l'établissement de la dérivation. Cette relation permet de calculer e en fonction de I que fait connaître le galvanomètre et de G supposé déterminé préalablement. Mais il faut remarquer que la différence e n'est pas égale à la différence à mesurer E , car l'établissement de la dérivation modifie le régime du circuit et diminue la résistance totale entre A et B ; toutefois, si la résistance du galvanomètre est très grande, les perturbations qui résultent de l'établissement du courant dérivé sont très faibles et e est alors sensiblement égal à E .

Les galvanomètres destinés aux mesures des différences de potentiel sont généralement gradués de telle sorte que la lecture de la déviation fasse immédiatement connaître, non pas l'intensité I du courant qui les traverse, mais la valeur en volts de la différence

de potentiel E qui produit ce courant ; ces instruments ont reçu le nom de *voltmètres*.

752. **Mesure de la force électromotrice d'une pile.** — *a.* — Il suffit, pour avoir cette force, de mesurer avec un électromètre la différence de potentiel des deux pôles en circuit ouvert.

b. — On peut effectuer la même mesure à l'aide d'un galvanomètre étalonné ; mais le galvanomètre ferme alors le circuit de la pile ce qui produit immédiatement une diminution dans la différence de potentiel des deux pôles, diminution qui est d'ailleurs d'autant moindre que la résistance du galvanomètre est plus grande. Si toutefois l'on désigne par E la force électromotrice de la pile, par r sa résistance intérieure et par R la résistance du galvanomètre, on a, d'après la loi de Ohm :

$$I = \frac{E}{R + r},$$

relation qui permet d'évaluer rigoureusement E si l'on a préalablement déterminé les résistances R et r . Dans le cas où R est très grand par rapport à r , on peut négliger la résistance intérieure r et écrire $E = IR$.

Il faut remarquer encore que le galvanomètre, en fermant le circuit, permet à la pile de fonctionner et par suite de se polariser, ce qui en diminue la force électromotrice ; mais c'est cette force électromotrice diminuée qu'il est utile de connaître au point de vue pratique, parce que c'est d'elle seule que l'on peut réellement disposer ; aussi les voltmètres sont-ils couramment utilisés pour les mesures industrielles.

c. — On peut encore déterminer la force électromotrice d'une pile en la comparant, par diverses méthodes, avec la force électromotrice de piles *étalons*, c'est-à-dire de piles dont la force électromotrice est constante et connue.

L'une des plus précises parmi ces méthodes est celle qu'a imaginée Poggendorff et que nous exposerons seule ici ; elle consiste à compenser la force électromotrice à mesurer au moyen de la différence de potentiel créée par une pile étalon entre deux points séparés par une résistance connue.

Dans le circuit de la pile étalon E (fig. 438) constituée par un nombre d'éléments suffisants pour que sa force électromotrice totale E soit supérieure à la force électromotrice à mesurer, on intercale deux boîtes de résistance R et R' ; entre les bornes A et B

de la boîte R' on place en outre une dérivation qui comprend un galvanomètre G et la pile dont on veut déterminer la force électromotrice E' . Cette pile doit être disposée de telle sorte qu'elle se trouve, dans le circuit dérivé, en opposition ⁽¹⁾ avec la pile étalon.

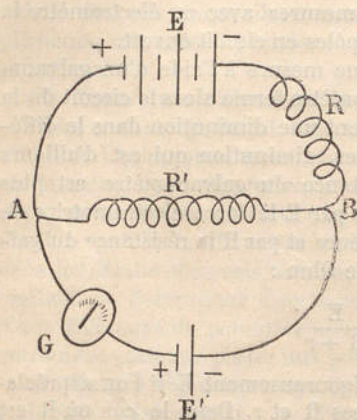


Fig. 458. — Mesure de la force électromotrice d'une pile par la méthode de Poggendorf.

Ceci fait, on règle par tâtonnements la valeur des résistances R et R' de façon que l'aiguille du galvanomètre reste au zéro, ce qui indique que le courant a alors la même intensité I en $AR'B$ et en $AERB$; si donc l'on applique les lois de Kirchhoff aux circuits fermés $AERBR'A$ et $AGE'BR'A$ on a, pour le premier :

$$E = I(p + R + R'), \quad (1)$$

en désignant par p la résistance intérieure de la pile étalon, et pour le second :

$$E' = IR', \quad (2)$$

puisque l'intensité du courant est nulle en $AGE'B$. En éliminant I entre ces deux équations il vient :

$$E'(p + R + R') = ER', \quad (3)$$

relation qui permettra de calculer E' , si l'on connaît la résistance intérieure p de la pile étalon.

On peut, comme l'a indiqué Bosscha, éviter d'avoir à déterminer la résistance de la pile étalon en effectuant une seconde expérience; si l'on donne, en effet, aux résistances R et R' des valeurs $R + r, R' + r'$ différentes de R et de R' mais telles que le galvanomètre G soit encore à 0, on a dans ces conditions :

$$E = I(p + R + r + R' + r') \quad (4)$$

et

$$E' = I(R' + r'), \quad (5)$$

(1) Voir note page 915.

ou, en éliminant I' :

$$E'(p + R + r + R' + r') = E(R' + r'). \quad (6)$$

En retranchant (3) et (6) membre à membre, il vient :

$$E'(r + r') = Er',$$

relation qui est indépendante de la résistance intérieure de la pile étalon.

Cette méthode a l'avantage d'éviter que la pile à essayer ne fonctionne et par suite ne se polarise au moment des déterminations.

On peut du reste remplacer le galvanomètre par un électromètre.

V. — Mesure des capacités.

733. **Principe de la méthode.** — On mesure la capacité d'un condensateur en la comparant à celle d'un condensateur étalon. Pour cela, on charge successivement au même potentiel les deux condensateurs à comparer en mettant leurs armatures en communication avec les deux pôles d'une pile constante, et l'on mesure la charge de chacun d'eux avec un galvanomètre balistique (§ 744). Soient Q et Q' ces charges, C la capacité du condensateur étalon et C' la capacité cherchée ; en désignant par V la différence de potentiel des deux armatures, différence qu'il est inutile de connaître pourvu qu'elle soit, comme nous l'avons supposé, la même pour les deux condensateurs, on aura :

$$Q = CV \quad \text{et} \quad Q' = C'V;$$

d'où :

$$\frac{C}{C'} = \frac{Q}{Q'},$$

formule qui permet de déterminer C' en fonction de C .

LIVRE VI

MÉTÉOROLOGIE

754. **Objet du livre.** — La Météorologie a pour objet l'étude des phénomènes physiques dont l'atmosphère est le siège; elle étudie les causes de ces phénomènes, les conditions dans lesquelles ils se produisent et cherche ensuite à les prévoir.

Les phénomènes qui font l'objet de la Météorologie peuvent d'ailleurs se diviser en diverses catégories suivant qu'ils sont plus spécialement relatifs à la température de l'air, à la pression ou à l'humidité atmosphérique, suivant qu'ils sont d'ordre électrique ou magnétique. Ces diverses catégories de phénomènes constitueront autant de Chapitres distincts.

CHAPITRE PREMIER

TEMPÉRATURE DE L'AIR, DU SOL ET DES MERS.

755. **Mesure de la température de l'air.** — La température de l'air, à un moment donné, se déduit des indications d'un bon thermomètre, placé dans des conditions spéciales que nous allons préciser et qui sont destinées à mettre l'instrument à l'abri de toute cause d'échauffement ou de refroidissement autre que celles qui proviennent d'un changement de température de l'air ambiant.

Le thermomètre doit être placé à l'ombre, afin d'éviter qu'il ne puisse s'échauffer sous l'action directe des rayons solaires; il doit être mis à l'abri de la pluie et de la rosée, afin que son réservoir ne puisse être le siège d'une évaporation qui abaisserait sa température; il doit, en outre, être préservé du rayonnement vers les espaces célestes par un écran de verre ou de bois, précaution sans laquelle il se refroidirait par une cause autre que celle de la tem-

pérature ambiante; il doit encore être établi à une certaine distance du sol (1 à 2 mètres), afin d'être soustrait à l'influence directe de la chaleur que rayonne la terre, et même être situé au-dessus d'un sol gazonné parce que le rayonnement est alors moindre; le thermomètre doit enfin être exposé à tous les vents, dans un endroit bien découvert.

On dispose ordinairement côte à côte un thermomètre à maxima, un thermomètre à minima et un thermomètre ordinaire à mercure.

756. Variations de la température de l'air. — L'air, surtout lorsqu'il est sec, est très transparent pour les diverses radiations solaires; aussi les rayons calorifiques émis par le soleil traversent-ils notre atmosphère sans subir d'absorption très notable et par suite sans en élever beaucoup la température. Ces rayons calorifiques peuvent ainsi arriver jusqu'au sol, qui les absorbe en proportion variable suivant sa nature; le sol échauffé rayonne de la chaleur obscure vers les espaces célestes et cède en outre une partie de sa chaleur aux couches d'air en contact avec lui; celles-ci s'élèvent par convection et sont remplacées par des couches nouvelles qui s'échauffent à leur tour, si bien que, par un temps calme, la température des couches inférieures de notre atmosphère est à chaque instant sensiblement la même que celle du sol.

On conçoit du reste que, si les quantités de chaleur reçue et perdue par le sol étaient constantes, il devrait s'établir un état d'équilibre qui déterminerait une température fixe et invariable pour le sol et l'air environnant. En réalité, il n'en est nullement ainsi et l'obliquité plus ou moins grande des rayons solaires d'une part, d'autre part la différence de transparence que l'atmosphère peut présenter, suivant son degré d'humidité, pour la chaleur rayonnée par la terre, modifient, indépendamment de phénomènes accessoires tels que neige, vent, pluie, etc., les quantités de chaleur reçue et perdue par une même surface d'un même sol, et rendent par suite compte des variations de température que l'on observe, en un même lieu, aux différentes heures de la journée et aux différentes époques de l'année, ou au même moment en différents points du globe. Ce sont ces variations de température et leurs causes que nous passerons d'abord en revue.

Des instruments spéciaux appelés *pyrhéliomètres* ou *actinomètres*, et dans le détail desquels nous ne saurions entrer ici, permettent d'ailleurs de déterminer à chaque instant l'intensité calorifique de

la *radiation solaire* en un point, c'est-à-dire la quantité de chaleur, exprimée en calories-gramme-degré, que reçoit par minute une surface de 1 centimètre carré exposée en ce point normalement aux rayons incidents.

L'un des actinomètres les plus employés est celui de Crova; sa partie essentielle est constituée par un thermomètre à alcool dont le réservoir, gros et sphérique, est enduit de noir de fumée et enfermé dans une enveloppe métallique polie. Cette enveloppe présente du reste une ouverture par laquelle on peut à volonté laisser pénétrer les rayons solaires. L'intensité calorifique de la radiation solaire se déduit de la dilatation qu'éprouve l'alcool, par minute, sous l'action de cette radiation.

757. **Variations diurnes et annuelles en un même lieu.** — Bien que le soleil envoie sensiblement vers la terre la même quantité de chaleur à toute heure du jour et à toute époque de l'année, la quantité de chaleur reçue par un même point du sol varie notablement d'une heure à l'autre et d'un jour à l'autre, par suite des divers mouvements, de rotation sur elle-même et de translation autour du soleil, qu'éprouve la terre dans sa marche diurne et annuelle.

La quantité de chaleur reçue par une même surface du sol est en effet d'autant plus considérable que les rayons solaires la frappent plus normalement; cette quantité croit donc, en un même jour, du lever du soleil à midi et décroît de midi au coucher du soleil. Pendant le cours d'une année, cette même quantité de chaleur est, dans l'hémisphère nord, d'autant plus grande à une même heure qu'on s'approche davantage du solstice d'été (21 juin) et d'autant plus faible qu'on est plus près du solstice d'hiver (21 décembre); la durée plus longue des jours en été, leur durée plus courte en hiver contribuent également à augmenter ou à diminuer la quantité totale de chaleur reçue pendant une même journée, à mesure que l'on s'approche du solstice d'été ou du solstice d'hiver. L'inverse se produit d'ailleurs dans l'hémisphère sud dont l'hiver correspond à notre été et *vice-versa*. Entre les tropiques, il y a par an deux époques pour lesquelles la quantité de chaleur reçue passe par un maximum, et deux autres pour lesquelles elle passe par un minimum.

Si l'on suppose que la transparence de l'air reste sensiblement constante, il est évident que, dans le courant d'une journée, la température de la surface du sol et des couches inférieures de l'at-

mosphère commencera à croître dès le lever du soleil pour augmenter rapidement jusqu'à midi ; à partir de ce moment la chaleur absorbée diminue, mais comme cette chaleur est encore pendant quelques heures supérieure à la chaleur perdue pendant le même temps, la température continue à croître jusque vers deux heures en hiver et vers trois heures en été ; la température décroît ensuite d'abord lentement, puis rapidement après le coucher du soleil, la chaleur perdue l'emportant de plus en plus sur la chaleur reçue, et passe par un minimum qui correspond sensiblement au lever du soleil.

De même, dans le courant d'une année et dans notre hémisphère nord, la température ira croissant à mesure que l'on s'approchera du solstice d'été. Mais ce n'est pas exactement à ce solstice que correspondra la température maxima ; pendant les jours qui suivent ce solstice, le sol gagne en effet, durant vingt-quatre heures, plus de chaleur qu'il n'en perd pendant le même temps et la température s'élève encore pendant un mois environ, elle commence ensuite à décroître et passe par un minimum qui, pour une raison inverse de la précédente, se produit, non à l'époque du solstice d'hiver, mais un mois plus tard, en moyenne.

La température d'un même point du globe est, en général, notablement modifiée dans sa marche diurne ou annuelle par une foule de causes parmi lesquelles nous devons signaler les vents, l'humidité plus ou moins grande de l'atmosphère, les nuages, la pluie.

Le vent, suivant les régions d'où il souffle, peut en effet élever ou abaisser la température et produire dans l'espace de quelques heures des oscillations très marquées.

L'humidité de l'atmosphère rend celle-ci moins transparente pour les radiations calorifiques, principalement pour les moins réfrangibles, et s'oppose par suite surtout au rayonnement terrestre. C'est pendant les nuits sereines que se produisent les gelées du printemps.

Nous avons déjà dit (§ 540) que les nuages formaient de véritables écrans pour le rayonnement de la chaleur terrestre. Leur action est surtout marquée lorsqu'ils se trouvent dans la direction zénithale du lieu considéré, parce que c'est suivant cette direction que le rayonnement du sol est plus intense.

Dans le jour, les nuages arrêtent non seulement le rayonnement terrestre, mais encore les rayons solaires, ce qui produit un effet inverse du précédent sur la marche de la température. En été, où

l'influence des rayons solaires est dominante, les nuages produiront en général un abaissement très marqué de la température; en hiver au contraire, l'influence du soleil étant moindre et les nuages étant en général amenés dans nos régions par les vents chauds du sud, la température est ordinairement moins basse par un ciel couvert que par un ciel clair.

La pluie a une influence analogue; elle élève, en général, la température de l'air en hiver et l'abaisse en été.

Par suite des perturbations apportées en un même lieu à la marche diurne et annuelle de la température par les divers phénomènes dont nous venons d'indiquer l'action, il est nécessaire, si l'on veut être renseigné exactement sur les variations de cette température, d'observer le thermomètre à mercure à des intervalles de temps rapprochés. Mais on peut, pour éviter d'avoir à faire ces observations, se servir d'un thermomètre enregistreur.

On appelle *température moyenne diurne*, la moyenne des températures prises d'heure en heure en un même lieu pendant une période de vingt-quatre heures; cette moyenne coïncide sensiblement avec la moyenne des températures maxima et minima de la journée.

La moyenne des températures moyennes diurnes en un lieu déterminé, pendant un mois ou durant une année, donne la *moyenne mensuelle* ou *annuelle* pour le lieu considéré.

758. **Distribution des températures à la surface du globe. Influence de la latitude, de l'altitude, de la proximité des mers, etc.** — Pour tous les points situés entre les deux tropiques, il existe deux époques par an où les radiations solaires sont, à l'heure de midi, c'est-à-dire au moment où le soleil passe au méridien du lieu, normales à la surface du sol. Tous ces points se trouvent donc sensiblement dans les mêmes conditions au point de vue de la quantité de chaleur reçue du soleil. Il n'en est plus de même au delà des tropiques, car l'obliquité des rayons solaires est, à une époque quelconque de l'année, d'autant plus grande en chaque point à midi que le point considéré est à une latitude plus élevée; la quantité de chaleur reçue diminue donc quand la latitude augmente, et l'on conçoit que la température moyenne de l'année décroisse à mesure que l'on s'éloigne des régions équatoriales pour s'approcher des régions polaires.

Cette décroissance des températures serait d'ailleurs régulière si une foule de causes, telles que l'altitude, le régime des vents, la

nature du sol, la proximité des mers, l'étendue des continents, etc., n'intervenaient pour en modifier la marche.

a. — Nous avons dit que c'était principalement par son contact avec le sol que l'atmosphère s'échauffait ; on conçoit dès lors que la température s'abaisse à mesure qu'on s'élève dans les couches supérieures de l'atmosphère et que le sommet des hautes montagnes soit plus froid que les plaines avoisinantes. Sans doute les montagnes réagissent par leur masse sur la température de l'air qui les environne, mais si la décroissance de la température est moins rapide quand on s'élève sur une grande chaîne de montagnes que lorsqu'on gravit un pic isolé ou que l'on fait une ascension en aérostat, elle n'en est pas moins très marquée. Les neiges éternelles qui recouvrent le sommet des hautes montagnes sont un indice suffisant de la faible valeur de leur température moyenne.

Il y a d'ailleurs en général, dans les couches supérieures de l'atmosphère, moins d'humidité et moins de brume que dans les couches inférieures. La transparence pour la chaleur obscure rayonnée par le sol est donc plus grande dans les régions élevées qui s'échauffent dès lors moins par le rayonnement du sol situé à leur niveau. C'est encore là une cause qui permet de rendre compte de la décroissance de la température de l'air à mesure qu'on la considère à une altitude plus grande.

b. — Les chaînes de montagne, en mettant les plaines avoisinantes à l'abri des vents froids ou des vents chauds, modifient notablement dans un sens ou dans un autre la température moyenne de ces plaines. Dans notre hémisphère et au-delà du tropique, les pays situés sur le versant sud d'une chaîne de montagne dirigée de l'Est à l'Ouest reçoivent les rayons solaires plus normalement et pendant plus longtemps que ceux qui sont sur le versant nord ; aussi ces derniers pays sont-ils en général plus froids que les premiers.

c. — La nature du sol peut également influer sur la température d'un lieu. En effet, pour une même quantité de chaleur reçue, la température du sol s'élève plus ou moins suivant le pouvoir absorbant, la chaleur spécifique et la conductibilité de ce sol. De plus, pour une même température, le sol chauffe plus ou moins les couches d'air avoisinantes suivant que son pouvoir émissif est plus ou moins grand. Les sols blanc crayeux s'échauffent beaucoup plus que les sols de couleur sombre, les plaines nues que les plaines recouvertes de végétation, les terrains secs que les terrains humides.

d. — Les variations de température sont toujours moins rapides à la surface des grandes masses d'eau (lacs, mer, océan) qu'à la surface du sol. La raison en est : 1° dans la transparence plus grande de l'eau pour la chaleur solaire (par suite de cette transparence la chaleur solaire, au lieu d'être complètement absorbée par les couches superficielles, pénètre jusqu'à une certaine profondeur et chauffe ainsi une plus grande masse); 2° dans le pouvoir émissif de l'eau qui est moindre que celui du sol; 3° dans la chaleur spécifique de l'eau qui est plus grande que celle du sol, si bien que, pour une même quantité de chaleur absorbée, l'élévation de température est moindre pour l'eau que pour le sol; 4° dans l'agitation incessante de l'eau qui mélange les couches superficielles chaudes avec les couches sous-jacentes plus froides.

L'air qui est en contact avec l'eau de la mer participe à ces faibles variations de température et les pays situés sur le littoral, constamment baignés par cet air, ont une température beaucoup plus constante que ceux qui sont situés plus profondément dans l'intérieur des continents. L'influence régulatrice des mers se fait d'ailleurs sentir en s'atténuant à une assez grande distance des côtes.

Nous indiquerons bientôt l'existence, au sein des mers, de courants d'eau chaude qui rendent très inégale la distribution des températures à la surface de ces mers. La proximité de ces courants explique pourquoi la température moyenne est plus élevée en certains points des côtes que dans d'autres régions situées à la même latitude.

759. **Isothermes. Climats.** — La distribution des températures à la surface du globe ne peut être établie, par suite des diverses causes locales que nous venons de signaler, qu'en déterminant expérimentalement la température moyenne annuelle de chaque point. Afin de juger plus facilement de la distribution des températures à la surface de la terre, on joint par un trait continu, sur une mappemonde, tous les points d'un même hémisphère qui possèdent la même température annuelle; les lignes ainsi tracées ont reçu le nom de lignes *isothermes*; on donne le nom d'*isothères* aux lignes d'égale température d'été et celui d'*isochimènes* à celles d'égale température d'hiver.

L'inspection de ces divers groupes de lignes montre que la température tend à s'abaisser à mesure que l'on s'élève en latitude, qu'il n'y a pas, d'une façon générale, de différence notable entre

les températures de l'été et de l'hiver dans les régions intertropicales, que la différence s'accroît à mesure que l'on s'éloigne des zones équatoriales, que l'on a bientôt deux saisons, puis quatre comme en France, qu'à des latitudes plus élevées les saisons intermédiaires s'effacent, si bien que l'on trouve de nouveau des zones à deux saisons, enfin que l'hiver devient de plus en plus long à mesure que l'on s'approche des pôles où il est continu. Mais ce n'est pas aux pôles même que se trouve l'isotherme la plus basse ou le point le plus froid et les isothermes forment, à la surface du globe, des courbes très irrégulières s'incurvant fortement, tantôt vers le nord, tantôt vers le sud, suivant la configuration des pays où on les considère. C'est ainsi par exemple que, le long des côtes, une même isotherme remonte vers le pôle ou descend vers l'équateur suivant que la côte qu'elle longe reçoit des courants d'eau chaude venant de l'équateur ou des courants d'eau froide venant des pôles.

On dit que le *climat* d'une localité est *uniforme*, lorsque la différence des températures moyennes du mois le plus froid et du mois le plus chaud n'atteint pas 10°. Si cette différence est comprise entre 10° et 20°, le climat est dit *variable*; il est *excessif* si cette même différence est supérieure à 20°. C'est surtout sur le bord de la mer que le climat est uniforme et nous avons indiqué les causes de cette uniformité; le climat devient au contraire excessif à mesure que l'on s'éloigne des côtes.

760. Température du sol, des sources et de la mer. — Nous avons vu que la température de la surface du sol subit des oscillations diurnes et annuelles. Ces oscillations se font sentir jusqu'à une profondeur qui varie avec la région du globe où on l'observe, avec la conductibilité et avec la perméabilité du sol, mais qui est toujours très faible. Dans nos climats, un thermomètre enfoncé à un mètre de profondeur dans le sol n'indique plus de différence de température entre le jour et la nuit, mais ses indications sont encore différentes entre l'été et l'hiver. L'oscillation annuelle s'affaiblit à mesure qu'on la considère dans une couche plus profonde; à 20 mètres le thermomètre ne varie plus et la température constante qu'il indique est sensiblement égale à la moyenne annuelle du lieu. Cette couche, pour laquelle la température du sol demeure invariable, a reçu le nom de *couche à température invariable*. A partir de cette limite, la température s'élève d'une façon plus ou moins régulière à raison de 1° par 32 mètres environ, sous l'action de la chaleur centrale du globe.

Le flux diurne et le flux annuel de chaleur pénètrent du reste dans le sol avec une telle lenteur que, à quelques décimètres de profondeur, l'heure du maximum se trouve pendant la nuit et l'heure du minimum pendant le jour; à 8 ou 10 mètres, le maximum annuel s'observe en hiver et le minimum en été. Toutefois la différence entre ces maxima et ces minima est, comme nous venons de le dire, fortement atténuée.

Si les caves de nos habitations nous paraissent chaudes en hiver et froides en été, c'est à cause de la température presque constante dont elles jouissent et du contraste de cette température avec la température extérieure.

Les eaux qui séjournent dans des puits suffisamment profonds ont aussi une température constante qui est sensiblement égale à la moyenne annuelle du lieu; de là la fraîcheur relative de ces eaux en été.

La température des sources dépend de leur trajet souterrain et elles sont d'autant plus chaudes qu'elles ont traversé des couches situées plus profondément; leur température peut atteindre 80° (*Chaudes Aigues*) et même 97° (*Agua calientes de la Trincheras* au sud de Porto Cabello); l'eau des geysers d'Islande est à la température d'ébullition. Lorsque, au contraire, les sources proviennent directement de la fonte des neiges après un trajet plus ou moins court au sein d'une montagne ou à travers des couches peu profondes de la croûte terrestre, elles ne peuvent être sensiblement influencées par la chaleur centrale du globe et conservent une température plus ou moins basse; on conçoit d'ailleurs qu'une source chaude puisse jaillir dans le voisinage d'une source froide comme cela a lieu par exemple au pied du glacier du Rhône.

La température de la mer varie, comme celle de la terre, avec la profondeur. Par suite de l'augmentation de densité qui résulte du refroidissement de l'eau, l'eau gagne le fond à mesure que sa température s'abaisse, pourvu toutefois que cette température ne descende pas au-dessous de + 4°. Dans nos régions, la température de la mer décroît lorsqu'on la mesure à une profondeur de plus en plus grande; il n'en est plus de même dans le voisinage des pôles où toute la surface est congelée.

La distribution décroissante des températures depuis les régions équatoriales jusqu'aux régions polaires produit, à l'intérieur des mers un vaste mouvement de circulation. Dans les régions froides, l'eau se refroidit par sa surface et gagne le fond, par suite de l'ac-

croissement de densité que détermine l'abaissement de sa température. L'eau chaude de la surface des régions voisines vient dès lors combler le vide ainsi produit, se refroidit et s'enfonce à son tour. Il s'établit donc un courant superficiel qui amène vers les pôles l'eau chaude des régions équatoriales, tandis qu'un courant profond, cheminant en sens inverse, apporte vers l'équateur l'eau froide des régions polaires; mais, à mesure qu'elles atteignent des régions plus chaudes, les eaux venues des régions polaires se réchauffent sous l'action du soleil et gagnent la surface pour revenir à leur point de départ; cette circulation, entretenue par la chaleur solaire, est d'ailleurs continue.

Indépendamment de cette circulation générale il se produit, au sein des mers, sous l'influence de causes que nous ne saurions énumérer ici, des courants plus limités qui constituent de véritables fleuves marins. L'un des plus connus, le *Gulf Stream*, apporte jusque sur les côtes de Norvège et d'Islande, les eaux chaudes du golfe du Mexique.

CHAPITRE II

PRESSION BAROMÉTRIQUE. VENTS.

761. **Variations de la pression atmosphérique.** — La pression atmosphérique est l'un des éléments qui nous renseigne le mieux sur les mouvements qui s'effectuent au sein de l'atmosphère. Nous avons appris déjà (§ 157 et suiv.) à mesurer cette pression, nous avons étudié ses variations avec l'altitude et donné (§ 165) une formule qui permet de la ramener à la valeur qu'elle aurait présenté au niveau de la mer; nous n'avons donc à nous occuper ici que des variations que présente cette pression en un même lieu; ces variations sont *régulières* ou *accidentelles*.

Les variations régulières sont les unes *diurnes*, les autres *annuelles*. Pendant une même journée, la pression atmosphérique passe normalement par deux maxima et par deux minima; le baromètre monte de 4 heures du matin (1^{er} minimum) à 9 ou 10 heures du matin (1^{er} maximum); il descend ensuite jusqu'à 4 heures du soir (2^o minimum), remonte jusqu'à 10 heures du soir (2^o maximum), puis redescend jusqu'à 4 heures du matin. Les heures et l'amplitude de ces oscillations varient légèrement en un

même lieu avec les saisons ; l'amplitude diminue à mesure que l'on s'éloigne de l'équateur.

Ces variations diurnes de la pression atmosphérique sont sous la dépendance des variations de température de l'atmosphère et des changements de force élastique qui en sont la conséquence (1).

Les couches inférieures de l'atmosphère peuvent être considérées comme enfermées dans une enveloppe flexible lentement déformable, constituée par les couches voisines. Le premier effet d'une variation de température des couches inférieures sera donc d'augmenter la pression supportée par le mercure de la cuvette d'un baromètre placé au niveau du sol, s'il s'agit d'un échauffement, de diminuer cette même pression, s'il s'agit d'un refroidissement. Mais les couches échauffées ou refroidies réagissent bientôt sur les couches qui les enveloppent et qui se déplacent dès lors dans un sens ou dans un autre, en produisant une variation de la pression inverse de la précédente. L'effet dû au déplacement de ces couches dépassant bientôt l'effet dû à la variation de force élastique qui a occasionné le déplacement, un excès de pression succède à un déficit et *vice-versa*.

Outre les variations diurnes, la pression atmosphérique présente normalement, en un même lieu, des variations annuelles. Ces variations sont principalement sous la dépendance des variations de la température et de l'état hygrométrique de l'atmosphère. La valeur de la pression présente deux maxima, l'un en hiver, l'autre en été et deux minima l'un au printemps, l'autre en automne. Ces fluctuations sont en général d'autant plus marquées que l'on considère un point du globe où les fluctuations de la température le sont elles-mêmes davantage. L'écart entre le printemps et l'hiver est à Montpellier de 2 millimètres environ.

Enfin le baromètre subit accidentellement des oscillations qui viennent souvent masquer les variations régulières de la pression atmosphérique. Ces oscillations peuvent fournir, comme nous le verrons, de précieux renseignements au point de vue de la prévision du temps, et sont sous la dépendance de diverses causes qui tendent sans cesse à troubler l'équilibre atmosphérique ; la chaleur solaire est l'une des plus importantes de ces causes.

(1) Peltier rapporte toutefois les oscillations diurnes du baromètre à l'électricité des courants aériens mis en mouvement par la chaleur solaire.

Lorsque la température d'une région du sol est plus élevée que celle des régions voisines, le premier effet de l'échauffement de l'air, au contact du sol de la région plus chaude, consiste, comme nous l'avons indiqué ci-dessus, en un accroissement de la pression atmosphérique, mais cette action n'est que de courte durée; l'air échauffé s'élève en vertu de sa densité moindre, arrive aux limites de l'atmosphère et se déverse sur les régions voisines, ce qui engendre une diminution de pression dans la région chaude et une augmentation de pression dans les régions environnantes.

L'équilibre atmosphérique est également troublé par l'évaporation plus ou moins active qui se produit à la surface des grandes masses d'eau, par la condensation et la précipitation de l'humidité de l'air sous forme de pluie, de neige ou de grêle.

762. Vents. — Quelle que soit d'ailleurs la cause qui détermine une inégalité de pression en divers points du globe, il suffit qu'une telle inégalité existe ⁽¹⁾ pour qu'il se produise un appel d'air des zones où la pression est faible vers celles où cette pression est plus forte, et par suite un écoulement d'air à la surface du sol des secondes zones vers les premières. C'est dans cet écoulement d'air que consiste le vent, dont on peut se proposer de déterminer la *direction*, la *force* et la *vitesse*.

Nous avons déjà vu (§ 173) comment on pouvait, à l'aide d'anémomètres, mesurer la vitesse d'un courant gazeux et par suite du vent. La direction du vent est déterminée facilement par une girouette. Quant à la force du vent, c'est-à-dire à l'action que le vent exerce sur l'unité de surface perpendiculaire à sa direction, on peut la déterminer, par exemple, à l'aide d'une plaque verticale placée normalement à la direction du courant gazeux et appuyée contre un ressort; la force du vent se déduit de la déformation du ressort.

Il existe des vents qui mélangent régulièrement, en différents points du globe, les diverses couches de l'atmosphère et qui sont dus aux différences d'échauffement de régions plus ou moins voisines; d'autres au contraire, dont la cause première est encore discutée, paraissent souffler avec une grande irrégularité et sont constitués par de puissants tourbillons qui se déplacent à la surface du globe. Nous considérerons successivement ces deux catégories de courants aériens.

(1) On suppose bien entendu que les points considérés sont à la même altitude, ou que la pression a été ramenée en chaque point à la valeur qu'elle aurait si ce point était au niveau de la mer.

763. **Vents réguliers.** — *Vents alizés. Moussons.* — Dans le voisinage des tropiques, de même qu'entre les tropiques et l'équateur, règnent des vents constants, appelés *vents alizés*, qui soufflent du nord-est dans l'hémisphère nord, du sud-est dans l'hémisphère sud. L'origine de ces courants aériens est la suivante.

Les régions voisines de l'équateur étant les plus chaudes du globe, l'air s'y échauffe plus fortement au contact du sol que partout ailleurs; il résulte de là la formation, au-dessus de l'anneau terrestre équatorial, d'un courant d'air ascendant qui appelle vers l'équateur l'air plus frais des latitudes plus élevées; c'est ce courant des basses régions de l'atmosphère qui constitue les vents alizés. D'autre part l'air chaud de l'équateur se refroidit pendant son ascension et se déverse vers les pôles en constituant les *contre-alizés*; une portion de ces courants aériens supérieurs redescend vers le sol au voisinage des tropiques pour alimenter les alizés, tandis qu'une autre partie se maintient dans les couches élevées et continue, en se refroidissant progressivement et s'abaissant de plus en plus, sa marche vers les régions polaires, d'où elle revient en rasant le sol vers les tropiques.

Dans la nappe ascendante de la région équatoriale, la vitesse des molécules d'air au voisinage du sol est sensiblement verticale et la composante horizontale de cette vitesse, qui représente la vitesse du vent est donc à peu près nulle. La région où ce fait se produit est la *région des calmes équatoriaux*. Il existe également une région de *calmes tropicaux* dans chaque hémisphère, au niveau des points où le courant descendant des contre-alizés vient rencontrer la surface du sol.

Il semble, d'après ce qui précède, que la direction des alizés devrait être exactement celle du nord au sud dans l'hémisphère nord, du sud au nord dans l'hémisphère sud et que les contre-alizés devraient avoir une marche rigoureusement inverse. En réalité, le mouvement de rotation de la terre vient modifier cette direction. Il faut remarquer en effet que l'air en contact avec la surface du sol doit, pour nous paraître immobile, être animé de l'ouest à l'est d'une vitesse de rotation égale à celle du point du globe où on le considère. Or la vitesse de rotation est très différente aux diverses latitudes; elle est en effet de 463 mètres par seconde à l'équateur, de 231 mètres par 60° de latitude et devient nulle au pôle. Lorsqu'une masse d'air est attirée d'un point à latitude plus élevée A, vers un autre de latitude suffisamment inférieure B, cette masse

rencontre successivement des parallèles dont la vitesse, dirigée de l'ouest à l'est, est plus grande que la sienne et augmente progressivement. En vertu de sa vitesse moindre de rotation, la masse d'air considérée paraîtra donc animée, par rapport aux objets qui se trouvent à la surface du sol, d'une vitesse de sens inverse, c'est-à-dire d'une vitesse dirigée de l'est à l'ouest, qui se combine avec la vitesse de déplacement de A vers B. L'inverse se produit d'ailleurs pour la masse d'air qui se dirige de B vers A puisque sa vitesse initiale, dirigée de l'ouest à l'est, est constamment plus grande que celle des divers parallèles qu'elle croise.

Ces considérations expliquent pourquoi les vents alizés soufflent du nord-est dans l'hémisphère nord, et du sud-est dans l'hémisphère sud, pourquoi au contraire les contre-alizés soufflent, comme on peut s'en rendre compte par l'observation des nuages, du sud-ouest dans l'hémisphère nord, du nord-ouest dans l'hémisphère sud.

Nous avons vu que l'obliquité de l'écliptique par rapport à l'équateur avait pour conséquence le déplacement vers le nord, pendant une moitié de l'année, vers le sud pendant l'autre moitié, du maximum de température du globe; ces déplacements joints à la répartition inégale des continents entre les deux hémisphères, à la configuration des côtes, etc., exercent aussi une influence sur la direction des alizés. C'est ainsi que, dans l'Inde, le vent souffle pendant tout l'hiver du N.-E. et pendant tout l'été du S.-O.; on a donné à ces vents périodiques le nom de *moussons*.

Brise de mer. Brise de terre. Vents locaux. — La brise de mer et la brise de terre, qui ne s'observent que dans le voisinage des côtes, sont surtout sensibles entre les tropiques et ne se font guère sentir dans nos régions que pendant l'été, dont elles contribuent à modérer les ardeurs; elles soufflent l'une, pendant le jour, du large vers les côtes, l'autre, pendant la nuit, en sens inverse.

Pendant le jour la température du sol du continent s'élève davantage que celle de la surface de la mer, et l'air, plus échauffé au contact du sol du littoral, s'élève en se refroidissant jusqu'à une certaine hauteur; il en résulte une diminution de pression au-dessus des côtes et l'établissement d'un courant inférieur qui apporte sur ces côtes l'air plus frais du large; c'est la *brise de mer*. Au contraire, dans les couches plus élevées de l'atmosphère, il s'établit un courant de sens inverse qui transporte vers la mer l'air qui s'est échauffé au contact du littoral.

Pendant la nuit, la mer se refroidit moins rapidement que la terre et l'on observe des phénomènes exactement inverses des précédents ; le courant inférieur souffle donc des côtes vers la mer et constitue la *brise de terre*.

Dans les pays montagneux, l'air froid du sommet des montagnes s'écoule vers les plaines voisines et produit le *vent des montagnes*.

Enfin il existe dans certaines régions des *vents locaux* bien caractérisés, dus en général à la configuration du sol ; qu'il nous suffise de citer le *Mistral* du midi de la France, le *Simoun* de l'Afrique et de l'Arabie.

764. **Vents irréguliers.** — *Cyclones, Ouragans, Tempêtes, Bourrasques.* — Indépendamment des vents réguliers que nous venons de décrire, il se produit fréquemment dans l'atmosphère, à des intervalles qui paraissent très irréguliers, de puissants tourbillons qui se déplacent à la surface du globe en couvrant des régions plus ou moins étendues. Ces phénomènes tourbillonnaires qui, dans les régions équatoriales, constituent les *cyclones*, engendrent dans nos pays les perturbations atmosphériques que l'on désigne sous le nom d'*ouragans*, de *tempêtes* ou de *bourrasques*, suivant leur intensité décroissante. Si la cause première de ces phénomènes et de leur déplacement est encore discutée, on est au contraire, grâce aux indications barométriques et aux observations relatives à la direction et à la force du vent, parfaitement renseigné sur leur constitution.

Quand on compare, en effet, à un même instant, la valeur de la pression, ramenée à 0° et au niveau de la mer, dans les différents points du globe atteints par un de ces tourbillons, on constate que les lignes passant par les points où cette pression a la même valeur, et appelées *lignes isobares*, constituent une série de courbes fermées plus ou moins analogues à des cercles ou à des ellipses concentriques, dont le centre commun correspond au centre du tourbillon. La pression présente sa plus faible valeur au niveau de ce point, qui constitue donc un centre de *basse pression* ou une *dépression* ; la pression croît progressivement de ce centre à la périphérie.

La direction du vent est, en chaque point du cyclone, à peu près parallèle à la direction de l'isobare en ce point ; l'air est donc animé d'un mouvement de rotation autour du centre de la dépression. Cette rotation s'effectue toujours, dans l'hémisphère nord, en sens inverse du mouvement des aiguilles d'une montre, c'est-à-dire de

l'est à l'ouest en passant par le nord. C'est le contraire dans l'hémisphère sud. On peut s'expliquer ce mouvement de rotation et son sens, en remarquant que l'air, appelé de toutes les directions vers le centre de la dépression A (fig. 459), doit, pour les motifs déjà

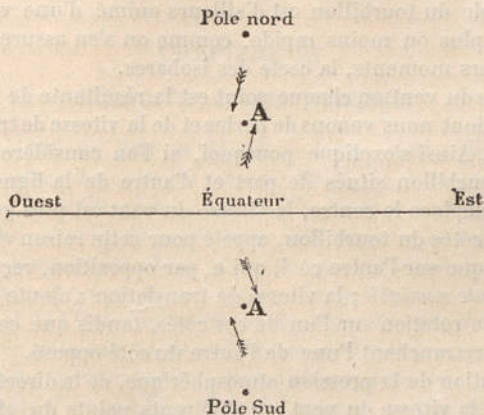


Fig. 459. — Rotation du vent autour du centre de dépression dans les cyclones.

indiqués à propos de l'étude des alizés, incliner comme le montrent les flèches vers l'est ou vers l'ouest, suivant qu'il arrive d'un point situé, par rapport au centre A, du côté de l'équateur ou du côté du pôle; la vitesse de translation dont sont animés les masses d'air ainsi déviées, combinées avec l'appel que continue à exercer le centre de dépression, rend dès lors compte non seulement du mouvement de rotation que prennent ces masses gazeuses autour du centre, mais encore du sens de cette rotation.

Il résulte de la relation que nous venons de signaler entre la direction du vent et celle des isobares, de la forme à peu près circulaire de ces isobares, et de l'invariabilité du sens de la rotation du vent autour du centre de la dépression, qu'il suffit, pour être renseigné à un moment donné sur la direction dans laquelle ce centre se trouve situé, de tourner *le dos au vent et d'étendre le bras gauche*. La direction du bras indique la direction cherchée; c'est en cela que consiste *la règle de Buys-Ballot*.

La vitesse du vent augmente à mesure que l'on se rapproche du centre et jusqu'à une certaine distance de celui-ci, mais elle est

nulle dans le voisinage immédiat de ce centre. La vitesse plus ou moins grande du vent à une même distance du centre de dépression est en général en rapport avec le rapprochement plus ou moins grand des isobares correspondant à une même différence de pression.

L'ensemble du tourbillon est d'ailleurs animé d'une vitesse de translation plus ou moins rapide, comme on s'en assure en dressant, à divers moments, la carte des isobares.

La vitesse du vent en chaque point est la résultante de la vitesse de rotation dont nous venons de parler et de la vitesse de translation du cyclone. Ainsi s'explique pourquoi, si l'on considère les deux côtés du tourbillon situés de part et d'autre de la ligne suivant laquelle se déplace le centre, la vitesse du vent est plus grande sur l'un de ces côtés du tourbillon, appelé pour cette raison *demi-cercle dangereux*, que sur l'autre côté, qui a, par opposition, reçu le nom de *demi-cercle maniable*; la vitesse de translation s'ajoute en effet à la vitesse de rotation sur l'un de ces côtés, tandis que ces mêmes vitesses se retranchent l'une de l'autre du côté opposé.

L'observation de la pression atmosphérique, de la direction, de la force et de la vitesse du vent en différents points du globe, aux époques successives de divers phénomènes tourbillonnaires a permis, non seulement d'établir la constitution de ces phénomènes, mais encore d'être renseigné sur leur marche et leurs allures habituelles et de déduire de leur apparition en un point du globe et du trajet qu'ils ont déjà effectué, la route qu'ils vont suivre et la vitesse de leur déplacement. Telle est la base sur laquelle repose actuellement la prévision du temps.

Le Bureau central météorologique de Paris reçoit tous les jours, de chaque station du réseau météorologique d'Europe, une dépêche qui indique la pression barométrique, la température, la direction et la force du vent, ainsi que l'état du ciel à sept heures du matin dans cette station. Ces multiples observations, ainsi centralisées, servent à dresser chaque jour les cartes météorologiques, et la comparaison de ces cartes avec celles des jours précédents permet en général de prévenir en temps utile les divers points menacés par une tempête.

Les vents irréguliers que nous venons de décrire apportent le plus souvent avec eux des nuages, de la pluie ou de la neige, et ce sont eux qui donnent naissance à la plupart de nos orages; toutefois il se forme fréquemment, surtout en été et dans les pays

de montagnes, des orages qui paraissent dépendre plutôt de conditions locales de température que des grandes dépressions atmosphériques.

Ces orages locaux n'ont en général que quelques kilomètres de diamètre et ne sévissent que sur des régions d'assez faible étendue.

CHAPITRE III

HUMIDITÉ ATMOSPHÉRIQUE.

765. **Humidité de l'air et du sol.** — L'évaporation qui se produit à la surface des grandes masses d'eau qui recouvrent la majeure partie de notre globe, ainsi qu'à la surface du sol et des végétaux, rend compte de la présence constante de la vapeur d'eau dans notre atmosphère. Nous avons vu que la vitesse de cette évaporation dépend, entre autres causes, de la température de l'eau ou du sol, et de l'état d'agitation ou de repos des couches d'air en contact avec cette eau ou ce sol. On conçoit dès lors que la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère soit essentiellement variable d'un point du globe à l'autre et qu'elle présente, en un même point, des valeurs très diverses à des époques différentes.

Les phénomènes météorologiques, rosée, brouillard, nuage, pluie, etc., dont il va être question dans ce Chapitre, dépendent bien plus du degré d'humidité relative, c'est-à-dire de l'état *hygrométrique* de l'atmosphère, que du degré d'humidité absolue, c'est-à-dire de la quantité même de vapeur que l'air contient.

L'état hygrométrique, que nous avons appris à mesurer, présente, suivant le lieu où on le considère, des valeurs qui varient entre des limites très étendues; c'est ainsi que l'air est constamment saturé au-dessus de la mer, des grandes nappes d'eau, et qu'il en est fréquemment de même au-dessus des continents pendant la pluie; par contre, dans le midi de la France, la fraction de saturation s'abaisse parfois jusqu'à 0.10. L'état hygrométrique présente, même normalement, en un même lieu, des variations notables; il passe par un maximum en été, au moment du lever du soleil, et par un minimum vers quatre heures du soir.

L'air restitue d'ailleurs d'une façon plus ou moins irrégulière au sol et aux mers l'humidité que les mers et le sol lui cèdent par évaporation. Sans parler, en effet, de l'absorption de la vapeur d'eau, lorsque l'air est voisin de son point de saturation, par les sols plus

ou moins hygrométriques, nous allons voir que cette restitution s'effectue sous bien des formes diverses, telles que rosée, pluie, neige, etc.

Il y a encore là une circulation continue, entretenue en définitive par la chaleur solaire.

766. **Rosée. Gelée blanche.** — Pendant la nuit, les corps qui sont situés à la surface de la terre rayonnent de la chaleur vers les espaces célestes ; leur pouvoir émissif étant d'ailleurs beaucoup plus grand que celui de l'air, ces corps se refroidissent plus rapidement que l'atmosphère et peuvent par suite atteindre, avant le lever du soleil, une température notablement plus basse que celle de l'air ambiant. Si cette température est inférieure à celle pour laquelle l'atmosphère serait saturée par la vapeur d'eau qu'elle renferme, il se fait, sur les corps ainsi refroidis, un dépôt de fines gouttelettes liquides qui constitue la *rosée*.

L'eau de l'atmosphère peut même passer de l'état de vapeur à l'état solide, si le rayonnement abaisse la température des corps au-dessous de 0° ; ces corps se recouvrent alors d'un dépôt blanc, formé de fines aiguilles de glace, qui constitue la *gelée blanche*, ou de petites paillettes, dues à l'agglomération de ces petits cristaux, qui forment le *givre*.

Toutes les causes qui modifient la vitesse de refroidissement ou l'abaissement de température d'un corps influent sur la formation de la rosée et de la gelée blanche. Ce sont les substances dont le pouvoir émissif est le plus grand, la conductibilité la plus faible et la chaleur spécifique la moins élevée (§ 540) qui se recouvrent le plus abondamment de ces dépôts. Ces dépôts s'observent surtout par un temps serein, à cause de la plus grande transparence de l'air pour les radiations obscures rayonnées (§ 548) ; les abris, les nuages, s'opposent (§ 540, 3°) à leur formation. On évite le plus souvent les effets désastreux des gelées du printemps sur les vignobles en produisant, au-dessus du sol, des nuages artificiels formés d'épaisses fumées obtenues par la combustion de substances goudronneuses.

Un vent léger favorise les dépôts de rosée ou de gelée blanche en renouvelant constamment les couches d'air dont la vapeur se condense au contact des corps refroidis ; mais un vent un peu fort a un effet inverse, car le renouvellement de ces mêmes couches d'air est alors trop rapide pour que leur température ait le temps de s'abaisser au-dessous du point qui correspondrait à leur saturation.

767. **Brouillards. Nuages.** — Les brouillards et les nuages sont dus à la condensation de la vapeur d'eau qui se trouve dans une masse d'air plus ou moins voisine de son point de saturation. Ces vapeurs condensées sont appelées brouillards ou nuages suivant qu'elles sont situées à la surface du sol ou dans les régions plus élevées de l'atmosphère ; mais cette distinction n'a rien d'absolu et la condensation qui constitue un nuage pour les habitants d'une vallée peut être en même temps un brouillard pour ceux d'une montagne voisine.

Les brouillards se forment à la surface du sol, et sont dus au refroidissement de l'air au-dessus d'un terrain humide ; la vapeur qui se dégage abondamment du sol sature les couches inférieures de l'atmosphère et se condense en formant des vésicules pleines ou creuses dont le diamètre moyen est de deux centièmes de millimètre environ. Les habitants des montagnes voient fréquemment la vallée qui est à leurs pieds disparaître sous le brouillard, tandis que le ciel reste pur et sans nuages au-dessus de leur tête.

Les nuages peuvent être dus, soit, comme les brouillards, au refroidissement d'une masse d'air voisine de son point de saturation, soit au mélange de deux masses d'air, presque saturées l'une et l'autre et dont les températures sont différentes.

Quand, par exemple, une masse d'air, après s'être échauffée et s'être chargée de vapeur d'eau au voisinage du sol ou des mers, est entraînée vers les régions supérieures de l'atmosphère, elle pénètre, à mesure qu'elle s'élève, dans des couches dont la pression est moindre ; il en résulte une augmentation de son volume et le froid produit par cette détente peut être suffisant pour condenser, sous forme de nuage, une partie de la vapeur d'eau que la masse d'air considérée renferme.

Il y aura de même condensation de vapeur d'eau sous forme de nuages, si une masse d'air, dont la température est de 10° par exemple, et qui contient une quantité de vapeur telle que sa pression soit égale à 8 millimètres, c'est-à-dire soit peu inférieure à la pression de $9^{\text{mm}}.16$ qui correspondrait à la saturation de cette masse, se mélange avec une masse égale d'air à 30° , dans laquelle la force élastique de la vapeur d'eau est égale à 30 millimètres de mercure, c'est-à-dire peu inférieure encore à celle, $31^{\text{mm}}.5$, qui correspondrait à la saturation de cette seconde masse. En effet le mélange prendrait sensiblement la température de 20° , s'il ne se produisait pas de condensation, et la tension de la vapeur dans ce

mélange serait sensiblement égale à $\frac{8+30}{2} = 19$ millimètres, c'est-à-dire supérieure à la tension maxima, 17^{mm}.39, qui correspond à la température de 20° ; une portion de cette vapeur doit donc passer à l'état liquide.

On classe les nuages soit d'après leur constitution, nuage de pluie, de neige, de glace, soit d'après leur forme, et on les ramène alors à quatre types principaux.

1° Les *cirrus*, petits nuages blancs très élevés et constitués par des aiguilles de glace ; ils précèdent les tourbillons orageux ; 2° les *cumulus* ou nuages à contours bien limités, dont la partie supérieure, d'un blanc nuageux, est mamelonnée et moutonneuse, tandis que la base un peu plus sombre est plane et horizontale, ils flottent dans des régions moins élevées que les *cirrus* ; 3° les *stratus*, nuages très allongés ; ils couvrent souvent une grande étendue du ciel ; 4° les *nimbus*, gros nuages opaques et sombres, formés de gouttelettes plus grosses que les précédents ; ils sont plus voisins du sol et se résolvent généralement en pluie.

Les fines gouttelettes ou les petits cristaux, qui constituent les nuages, étant plus denses que l'air, devraient tomber vers le sol ; il faut remarquer toutefois que leur état extrême de division ralentit énormément, par suite de la résistance de l'air, leur vitesse de chute. Diverses causes ont d'ailleurs été invoquées pour rendre compte de la suspension des nuages dans l'atmosphère, et il est probable que c'est tantôt aux unes, tantôt aux autres qu'il faut attribuer cette suspension.

On peut en effet faire intervenir l'influence de l'électricité des nuages qui les repousse loin du sol, des courants d'air ascendants ou même des courants aériens horizontaux qui contrarient leur chute. On peut encore penser que le nuage tombe lentement, mais que sa partie inférieure repasse à l'état de vapeur à mesure qu'elle descend dans des couches plus chaudes et moins humides, tandis qu'il se produit de nouvelles condensations à la partie supérieure.

768. **Pluie. Grêle. Verglas. Neige.** — Quand les couches d'air qui entourent un nuage sont assez éloignées de leur point de saturation, le nuage se dissipe peu à peu, à moins que la cause qui l'a produit ne continue à agir. Si, au contraire, le nuage se trouve dans un milieu à peu près saturé, les gouttelettes qui le composent, plus froides que l'air des couches sous-jacentes, condensent à leur surface, à mesure qu'elles tombent en vertu de leur poids, de nou-

velles quantités de vapeur, elles grossissent progressivement, et arrivent ainsi jusqu'au sol; c'est là le mécanisme de la *pluie*.

Lorsque les gouttes, avant d'arriver au sol, traversent un courant d'air suffisamment froid, elles se congèlent et tombent sous forme de *grêlons* dont la grosseur égale quelquefois celle d'un œuf de pigeon. Toutefois le mode de formation de la grêle est encore mal connu. La grêle accompagne en général les orages et paraît liée aux phénomènes électriques de l'atmosphère.

En hiver, des gouttes de pluie surfondues ou à une température voisine de 0° se congèlent parfois à la surface du sol refroidi qu'elles recouvrent de *verglas*. Cette solidification peut se produire également sur les branches des arbres, mouillées par la pluie; lorsque l'eau est surfondue, la solidification peut se faire brusquement et provoquer des dégâts considérables, comme cela est arrivé en 1879 dans la forêt de Fontainebleau.

Quand la condensation des vapeurs de l'atmosphère s'effectue à une température inférieure à 0°, l'eau passe directement de l'état de vapeur à l'état de fines aiguilles cristallines qui, de même que les gouttelettes liquides de la pluie, condensent la vapeur des couches d'air qu'elles traversent pendant leur chute; il résulte de là la formation de nouvelles aiguilles qui s'assemblent avec les premières et constituent des *flocons de neige*. La neige est plus rare par les grands froids que par une gelée faible.

La répartition des pluies varie très notablement d'une région à l'autre; elle varie également avec les saisons. Il tombe en général plus d'eau dans la région des tropiques que dans les régions polaires, sur le bord des mers que dans l'intérieur des continents, en automne que pendant les autres saisons. Les montagnes, les cultures, les forêts surtout exercent une influence considérable sur la distribution des pluies.

On évalue la quantité d'eau tombée en un lieu d'après l'épaisseur de la couche que formerait cette eau à la surface du sol de ce lieu, s'il n'y avait ni absorption, ni écoulement, ni évaporation; on mesure cette couche en recevant

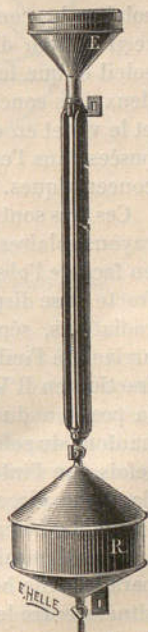


Fig. 460. — Pluviomètre.

l'eau de pluie dans un *pluviomètre* disposé à demeure; le pluviomètre (fig. 460) est un récipient en zinc terminé par un entonnoir d'ouverture exactement connue; sa forme est variable, mais elle est telle que l'évaporation de l'eau soit aussi faible que possible. Il est alors facile de déduire de la surface de l'ouverture du pluviomètre, et de la quantité d'eau recueillie dans l'instrument, l'épaisseur de la couche tombée. Il suffit d'ajouter les résultats des observations journalières pendant un an pour avoir l'épaisseur de la couche annuelle. Le pluviomètre doit être placé sur un poteau isolé, dans un endroit non abrité, à un mètre environ du sol.

769. **Arc-en-ciel. Halos. Couronnes.** — Lorsque le soleil perce les nuages pendant la pluie ou peu après, on aperçoit fréquemment dans le ciel un arc présentant les couleurs brillantes du spectre solaire; les conditions nécessaires à la production de cet arc, qui a reçu le nom d'*arc-en-ciel*, sont que l'observateur tourne le dos au soleil et que le soleil soit assez bas sur l'horizon. On voit souvent deux arcs concentriques, l'un très brillant avec le rouge en dehors et le violet en dedans, l'autre moins éclatant avec les couleurs disposées dans l'ordre inverse; il existe quelquefois plus de deux arcs concentriques.

Ces arcs sont dus aux réfractions et aux réflexions que subissent les rayons solaires dans les gouttes de pluie situées dans l'atmosphère en face de l'observateur. Un rayon solaire tel que SI (fig. 461) se réfracte et se disperse à son entrée dans la goutte en I; les diverses radiations, séparées par la réfraction, se réfléchissent en RV et arrivent à l'œil de l'observateur après avoir subi une nouvelle réfraction en R'V'. La direction de ces rayons émergents varie avec la position du point I sur la goutte et par suite, pour une même hauteur du soleil, avec la situation de la goutte. On démontre toutefois que l'intensité de la lumière émergente est surtout intense dans une direction qui fait, avec la direction des rayons solaires incidents, un angle de 40° pour le violet et de 42° pour le rouge. Les gouttes qui enverront le plus de lumière à l'observateur et qui paraîtront de beaucoup les plus brillantes sont donc celles qui seront situées entre les nappes des deux cônes, dont l'axe commun est la droite qui passe par le soleil et par l'œil de l'observateur et dont les angles d'ouverture sont égaux, pour l'un à 40°, pour l'autre à 42°. Les gouttes situées en dehors ou en dedans de ces deux cônes n'envoient que très peu de lumière et passent inaperçues; d'autre part les gouttes situées sur le premier cône envoient de la lumière

violette, celles qui se trouvent sur le second de la lumière rouge, et celles dont les positions sont intermédiaires aux précédentes les couleurs intermédiaires. L'observateur voit donc un arc lumineux avec violet en dedans et rouge en dehors.

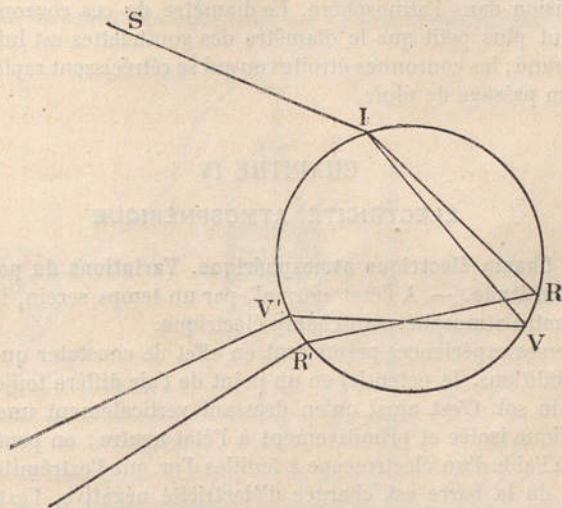


Fig. 461. — Réfraction et réflexion des rayons solaires, par une goutte d'eau.
Théorie de l'arc-en-ciel.

Les autres arcs-en-ciel que l'on peut observer sont dus à des rayons qui ont subi deux ou plusieurs réflexions à l'intérieur des gouttes de pluie et leur explication est analogue à la précédente.

C'est encore une explication analogue qui rend compte des *halos*, cercles lumineux légèrement irisés que l'on peut observer autour du soleil ou de la lune, lorsque les rayons envoyés vers nous par ces astres ont été réfractés et réfléchis par de fines aiguilles de glace, de forme prismatique, qui flottent dans les régions supérieures de l'atmosphère.

Les halos sont surtout brillants dans les régions polaires; ils sont constitués par un ou par deux cercles concentriques que coupe parfois une bande lumineuse horizontale. Les points d'intersection de cette droite et des cercles sont brillants; ils donnent l'apparence de faux soleils ou de fausses lunes, et portent, dans le premier cas, le nom de *parhélies*, dans le second, celui de *parasélènes*.

Enfin on observe fréquemment autour du soleil ou de la lune des auréoles lumineuses qui ont reçu le nom de *couronnes* ⁽¹⁾ et qui, comme nous l'avons déjà indiqué (§ 572), sont dues à la diffraction de la lumière solaire ou lunaire par des gouttes d'eau en suspension dans l'atmosphère. Le diamètre de ces couronnes est d'autant plus petit que le diamètre des gouttelettes est lui même plus grand; les couronnes étroites ou qui se rétrécissent rapidement sont un présage de pluie.

CHAPITRE IV

ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE

770. Champ électrique atmosphérique. Variations du potentiel avec l'altitude. — A l'état normal, par un temps serein, il existe dans notre atmosphère un champ électrique.

Diverses expériences permettent en effet de constater que, dans ces conditions, le potentiel en un point de l'air diffère toujours de celui du sol. C'est ainsi qu'en dressant verticalement une barre métallique isolée et primitivement à l'état neutre; on peut constater, à l'aide d'un électroscope à feuilles d'or, que l'extrémité supérieure de la barre est chargée d'électricité négative, l'extrémité inférieure d'électricité positive (Lemônnier).

Un électroscope à feuilles d'or dont le bouton est remplacé par une tige métallique terminée en pointe aiguë (*électroscope de Saussure*) accuse par la divergence de ses feuilles, lorsque la cage est au sol, que le potentiel du point où se trouve l'extrémité de la tige diffère de celui du sol.

Si l'on relie par un cordon conducteur une flèche métallique à un électroscope à feuilles d'or, on observe, lorsqu'on lance la flèche verticalement, une divergence des feuilles qui augmente à mesure que la flèche s'élève (Becquerel et Breschet).

Pour mesurer le potentiel en un point de l'air, il suffit du reste de placer en ce point un corps métallique terminé par une pointe aiguë et mis en relation avec l'aiguille d'un électromètre à quadrans par exemple; en vertu du pouvoir des pointes (§ 610) il faut, pour qu'il y ait équilibre électrique, que la densité électrique soit

⁽¹⁾ A cause de l'éclat du soleil, il est souvent nécessaire, pour observer les couronnes solaires, de regarder l'astre par réflexion dans un miroir noir.

nulle sur la pointe et, par suite, que cette pointe, l'aiguille de l'électromètre et le conducteur qui les relie l'une à l'autre soient au même potentiel que la couche d'air dont la pointe est environnée. La réalisation pratique d'une pointe parfaite étant très difficile, on lui substitue un tube métallique *t* (fig. 462) à travers lequel on fait écouler

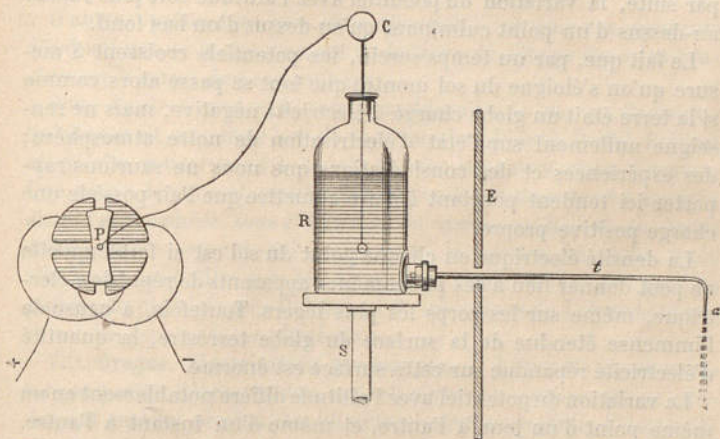


Fig. 462. — Appareil pour mesurer le potentiel en un point de l'atmosphère.

un liquide goutte à goutte; les gouttes liquides entraînent avec elles l'électricité du tube et celui-ci prend le potentiel du point *a* d'où les gouttes se détachent. Le réservoir *R* qui alimente le tube doit être isolé et mis en relation avec l'aiguille *P* de l'électromètre; il est alors facile de déduire des positions successives de cette aiguille, la valeur que présente, à chaque instant, le potentiel du point *a* de l'atmosphère où se produit l'écoulement.

On peut, par un dispositif spécial, enregistrer photographiquement les indications de l'électromètre.

Les indications fournies par l'appareil que nous venons de décrire sommairement montrent que, par un temps serein, le potentiel de l'air va en augmentant à mesure que l'on s'éloigne du sol. La variation du potentiel avec l'altitude dépend de la forme du sol à l'endroit considéré; elle est beaucoup plus rapide au-dessus d'un point culminant, d'une tour, d'un pic isolé qu'au-dessus d'un ravin, d'une cour entourée de murs élevés, d'une rue. Les surfaces équipotentielles les plus voisines du sol en suivent les irrégularités,

mais l'effet de ces irrégularités s'atténue à mesure qu'on s'élève, si bien qu'on peut admettre que leur action ne se fait plus sentir à une certaine hauteur et que les surfaces sont alors des sphères concentriques au globe terrestre. On conçoit dès lors que la distance de deux surfaces équipotentielles voisines soit plus petite et que, par suite, la variation du potentiel avec l'altitude soit plus rapide au-dessus d'un point culminant qu'au-dessus d'un bas fond.

Le fait que, par un temps serein, les potentiels croissent à mesure qu'on s'éloigne du sol montre que tout se passe alors comme si la terre était un globe chargé d'électricité négative, mais ne renseigne nullement sur l'état d'électrisation de notre atmosphère; des expériences et des considérations que nous ne saurions rapporter ici tendent pourtant à faire admettre que l'air possède une charge positive propre.

La densité électrique en chaque point du sol est si faible qu'elle ne peut donner lieu à des phénomènes apparents de répulsion électrique, même sur les corps les plus légers. Toutefois, à cause de l'immense étendue de la surface du globe terrestre, la quantité d'électricité répandue sur cette surface est énorme.

La variation du potentiel avec l'altitude diffère notablement en un même point d'un jour à l'autre, et même d'un instant à l'autre. Au-dessus d'une plaine elle est en général de 10 à 1000 volts par mètre, mais elle peut présenter des valeurs plus grandes encore; cette variation est ordinairement plus considérable par les temps sereins que par les temps couverts, en exceptant les temps d'orage. Souvent, par les temps couverts, et presque toujours, lorsqu'il pleut, la valeur du potentiel diminue avec l'altitude, le sol doit alors être considéré comme positif.

771. Origine de l'électricité atmosphérique. — On est loin d'être fixé sur l'origine de l'électricité atmosphérique et nous nous bornerons à rapporter brièvement les principales théories qui ont été émises à ce sujet.

On a d'abord attribué l'électricité atmosphérique au frottement des couches d'air les unes contre les autres, puis au frottement de l'air humide contre les gouttelettes d'eau qu'il transporte (Andries) ou contre les parties solides de la surface terrestre (Hoppe), ou encore contre les aiguilles de glace des cirrus (Luvini).

Pour Volta, Lavoisier, Laplace, de Saussure, etc., la cause productrice de cette électricité serait l'évaporation qui se fait journellement à la surface du globe; la vapeur emporterait dans l'air

de l'électricité positive, tandis que le sol resterait chargé d'électricité négative. Becquerel a ajouté à cette cause l'influence de la végétation.

Pour Palmieri, ce serait au contraire dans la condensation des vapeurs qu'il faudrait chercher l'origine première de l'électricité atmosphérique.

D'autres prétendent que cette électricité est due aux courants d'induction que le mouvement de la terre développe dans les couches supérieures de l'atmosphère.

Pour d'autres encore, la terre posséderait une charge électrique qu'elle aurait emportée lors de sa formation (Planté, Pellat, Peltier) et qu'elle conserverait à cause de son isolement dans l'espace. Une partie de cette charge électrique serait constamment emportée dans l'atmosphère sous l'influence de causes multiples, en particulier par les vapeurs qui se forment à la surface du globe, mais elle serait recueillie par les nuages et ramenée au sol par les pluies; de plus, d'après Peltier, nous recevriions de l'électricité positive des espaces inter-planétaires.

772. Orages. Electrification des nuages. — A la suite de circonstances particulières, encore imparfaitement connues, qui se produisent surtout pendant les chaudes journées de l'été, l'électricité s'accumule sur certains nuages, de telle sorte qu'en certains points du globe la distribution normale des potentiels est profondément troublée. Il se produit alors des manifestations électriques qui sont accompagnées de vent, de pluie, ou de grêle; l'ensemble de ces phénomènes constitue un *orage*.

Les orages sont le plus souvent sous la dépendance de grandes dépressions atmosphériques; parfois pourtant, surtout dans les pays de montagne, ils paraissent relever de causes locales et on peut les regarder comme constitués par de petites dépressions présentant tous les caractères des dépressions plus étendues. Les conditions les plus favorables à leur production consistent dans une température élevée au moment d'une dépression barométrique.

C'est surtout pendant l'été, de trois à quatre heures du soir, qu'éclatent les orages; ils sont beaucoup plus fréquents dans les zones tropicales que dans nos contrées et sont excessivement rares dans les régions polaires.

Franklin a démontré le premier la nature électrique des phénomènes orageux, mais l'on est encore réduit à des conjectures, en

ce qui concerne l'origine des nuages d'orage et la distribution de l'électricité dans ces nuages.

Pour les uns, l'électrisation des nuages serait due à leur formation par condensation au milieu d'une masse d'air électrisée; pour d'autres, les nuages orageux s'électriseraient au contact du sol, du sommet des montagnes par exemple, et emporteraient avec eux leur charge; pour d'autres encore (Faye, Pellat) la charge électrique de ces nuages serait due au mouvement giratoire des tourbillons aériens et à des phénomènes d'influence. Pellat a montré que la quantité d'électricité négative répandue à la surface de la terre suffisait pour expliquer comment, dans les tourbillons aériens qui constituent les orages, les nuages peuvent acquérir par influence des charges électriques suffisantes pour donner lieu aux manifestations électriques dont il sera question plus loin; il se produirait entre les divers nuages en présence, sous l'action du mouvement giratoire du tourbillon, des phénomènes analogues à ceux qui ont lieu dans les machines électriques à influence.

On n'est pas mieux fixé sur la constitution des nuages orageux; tandis que les uns les considèrent comme formés d'un ensemble de masses isolées possédant chacune une charge propre; d'autres les regardent comme des conducteurs chargés d'électricité seulement à leur surface.

773. **Foudre. Eclair. Tonnerre.** — Quoi qu'il en soit, les nuages orageux mettent en jeu des quantités énormes d'électricité et peuvent présenter entre eux, ou avec le sol, des différences de potentiel considérables, comme en témoignent le nombre et la longueur des étincelles électriques qui éclatent pendant les orages. On a donné à ces gigantesques étincelles le nom d'*éclair*. La *foudre* est un éclair jaillissant entre un nuage et le sol; le *tonnerre* est le bruit de l'explosion due à ces décharges électriques.

On distingue plusieurs espèces d'éclairs; les principales sont les éclairs *linéaires*, les éclairs *diffus* et les éclairs *en boule*. Les éclairs linéaires sont constitués par des traits de feu de formes diverses. Les éclairs diffus sont en général dus à des éclairs linéaires masqués par une couche de nuages; les lueurs diffuses, non suivies de détonation, que l'on observe parfois pendant les orages, ne paraissent pas devoir être rangées parmi les éclairs. Les éclairs dits *de chaleur* sont les éclairs d'un orage trop éloigné de nous pour que le bruit du tonnerre arrive jusqu'à nos oreilles. Enfin les éclairs en boule sont constitués par un globe de feu qui, d'ordi-

naire, se meut assez lentement et disparaît avec ou sans détonation.

Les éclairs linéaires sont les plus communs et les mieux connus ; ils sont analogues aux étincelles de nos bobines d'induction ou de nos machines à influence, mais ils ont souvent plusieurs kilomètres de longueur ; ils sont en général sinueux et présentent de nombreuses ramifications que l'on a pu photographier. La durée des éclairs est excessivement courte d'après Wheatstone qui a cherché à la déterminer par la méthode stroboscopique ; elle serait pourtant appréciable d'après Colladon et Trouvelot. Les éclairs qui semblent avoir une longue durée sont en réalité constitués par une série d'étincelles distinctes se succédant très rapidement.

Les éclairs linéaires sont toujours accompagnés de tonnerre. Le bruit du tonnerre n'est pas en général perceptible à plus de 25 kilomètres. La distance à laquelle éclate un éclair se déduit, au moyen de la formule du mouvement uniforme, de la vitesse du son dans l'air et de l'intervalle de temps qui s'écoule entre le moment où l'on entend le tonnerre et celui où l'on a perçu l'éclair. La durée du tonnerre n'est point instantanée comme celle de l'éclair qu'il accompagne, et la cause en est due en partie à la longueur sur laquelle se produit l'explosion ; le son engendré simultanément en tous les points du trajet de l'éclair doit en effet, pour parvenir à notre oreille, franchir des distances différentes. Les roulements du tonnerre sont encore prolongés par les réflexions qui se font sur les nuages et sur les montagnes.

Les effets de la foudre sont de même nature que ceux que nous avons étudiés à propos des décharges électriques ; ils n'en diffèrent que par leur puissance. La foudre rougit, fond et volatilise les corps bons conducteurs ; elle perce, brise, déplace les mauvais conducteurs, enflamme les matières combustibles, renverse, paralyse ou tue l'homme ou les animaux qu'elle frappe.

La foudre tombe principalement sur les points culminants, pics élevés, cheminées d'usine, clochers d'église, arbres élevés et surtout arbres isolés dans une plaine, etc. ; ces points étant, en effet, plus rapprochés des nuages orageux que les points voisins, l'électricité, développée par l'influence des nuages, s'y accumule en raison même de cette distance moindre. Cette électricité s'échappe d'ailleurs en partie par les pointes ou les arêtes les plus vives et peut ainsi contribuer à ramener lentement les nuages à l'état neutre, lorsque la décharge brusque ne se fait pas.

La pluie qui tombe généralement pendant les orages rend plus conductrice la surface des corps qu'elle mouille et diminue les dangers de la foudre à l'intérieur d'une maison par exemple, en facilitant l'écoulement de l'électricité par la surface mouillée des murs.

Des hommes ou des animaux sont parfois foudroyés en temps d'orage lorsque la foudre, sans les atteindre directement, tombe à une distance même assez considérable. Ce phénomène, qui a reçu le nom de *choc en retour*, peut s'expliquer de la façon suivante. Lorsqu'un nuage orageux s'approche de nous, il agit sur notre corps par influence et y accumule graduellement, sans que nous éprouvions d'ailleurs la moindre sensation, des quantités croissantes d'électricité de nom contraire à la sienne, tandis que l'électricité de même nom s'écoule dans le sol. Si le nuage se décharge brusquement même à une distance assez grande, les phénomènes d'influence cessent brusquement et notre corps est parcouru par un courant de décharge, dû à la recombinaison de l'électricité qui le chargeait avec celle du sol. Le courant de décharge sera du reste d'autant plus fort et ses effets d'autant plus redoutables que les phénomènes d'influence auront été plus marqués, que le nuage orageux aura été plus chargé et plus près de nous au moment de sa décharge, et que nous aurons été nous-mêmes en communication plus parfaite avec le sol.

774. **Paratonnerre.** — C'est Franklin qui a eu le premier l'idée d'utiliser le pouvoir des pointes pour protéger les édifices contre la foudre, en les surmontant d'une pointe métallique en communication métallique avec le sol. L'ensemble de la pointe et des conducteurs constitue le *paratonnerre* de Franklin. La pointe se fait aujourd'hui en platine ou en cuivre rouge; elle est fixée à l'extrémité d'une tige en fer disposée elle-même à la partie supérieure de l'édifice à protéger et mise en communication avec le sol par une chaîne ou par des barres de fer de 15 millimètres de diamètre. La communication de ce conducteur avec le sol doit être aussi parfaite que possible; on réalise cette condition en faisant plonger l'extrémité inférieure du conducteur dans l'eau d'un puits et en l'immergeant à une profondeur telle qu'elle soit constamment mouillée par l'eau, alors même que celle-ci atteint son niveau le plus bas. Si l'eau manque, l'extrémité du conducteur doit être enfouie dans le sol et entourée, sur une longueur suffisante, d'une bonne couche de braise des boulangers, qui conduit assez bien l'électricité. Pour obtenir une communication plus parfaite,

on relie souvent l'extrémité du conducteur à de larges plaques de cuivre immergées dans l'eau ou enfouies dans le sol. Toutes les pièces métalliques de l'édifice doivent être reliées au conducteur du paratonnerre.

Le paratonnerre a une action préventive et une action préservatrice. Sous l'influence d'un nuage orageux, la pointe laisse échapper l'électricité de signe contraire qui va neutraliser l'électricité du nuage, tandis que l'électricité de même signe s'écoule dans le sol, c'est là l'action préventive. L'action préservatrice du paratonnerre, due à la situation de sa pointe à la partie culminante de l'édifice et à sa bonne communication avec le sol, consiste à recevoir le coup de foudre et à conduire la décharge jusqu'au sol. On admet, sans que ce fait soit rigoureusement établi, que l'action préservatrice d'un paratonnerre s'exerce sur un cône ayant pour sommet la pointe et pour base un cercle de rayon égal au double de la hauteur du paratonnerre au-dessus du plan de cette base, quel qu'en soit le niveau.

On obtient une protection plus efficace des édifices en les enveloppant dans une sorte de cage métallique en communication avec le sol. Nous avons déjà vu (§ 642) que les corps placés à l'intérieur d'une cage métallique étaient soustraits à l'influence des corps extérieurs électrisés; si donc un coup de foudre vient à frapper la cage, les effets ne pourront point s'en faire sentir à l'intérieur. Pour réaliser la disposition que nous venons d'indiquer, on place le long des angles des façades, des corniches, du faite des toits, des cheminées, etc., des tiges métalliques ou de simples fils galvanisés masqués le plus souvent par des ornements des façades et reliés les uns aux autres de façon à former un vaste réseau à larges mailles (fig. 463). Il faut que la communication de ce réseau avec le sol soit établie avec soin et sur plusieurs points. Les canalisations d'eau et de gaz doivent être reliées à ce réseau dès leur entrée

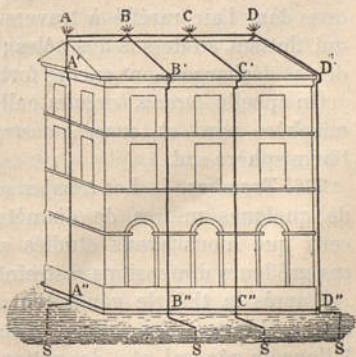


Fig. 463. — Paratonnerre à pointes multiples.

dans l'édifice; les masses métalliques intérieures doivent de même être reliées entre elles et mises en communication avec le réseau extérieur, ou mieux directement avec le sol. Enfin on peut, à tous les angles, à toutes les parties saillantes de l'édifice, fixer sur le réseau extérieur des faisceaux de pointes métalliques A, B, C, D. De là le nom de paratonnerres à *pointes multiples* donné à ce système qui a été préconisé et mis en pratique par Melsens.

775. **Aurores polaires.** — Ce sont des phénomènes électriques qui se produisent presque toutes les nuits dans les régions polaires et qui consistent généralement en un arc lumineux situé du côté du pôle et s'élevant au-dessus d'un segment obscur dont le centre correspond au nord magnétique; de cet arc s'élancent des jets de lumière qui passent du rouge clair au rouge sombre et dont l'intensité lumineuse se modifie constamment. Ce phénomène est d'ailleurs essentiellement variable de forme et d'aspect; il est, lorsqu'on le contemple des régions polaires, remarquable par la diversité de ses couleurs et par la vivacité de ses teintes. D'après certains auteurs les aurores polaires seraient accompagnées d'un bruissement particulier.

La théorie des aurores polaires est loin d'être entièrement établie. On attribue généralement ce phénomène à des décharges électriques dans l'air raréfié à travers les brumes et les nuages glacés qui flottent au-dessus des pôles; mais la cause et le mécanisme de ces décharges sont encore fort discutés.

On appelle *aurores boréales* celles qui se produisent dans l'hémisphère nord, et, *aurores australes* celles que l'on observe dans l'hémisphère sud.

776. **Trombes.** — Les *trombes* sont de petits tourbillons aériens de quelques mètres de diamètre qui rappellent, en miniature, ceux que nous avons étudiés sous le nom de cyclones et qui, malgré leurs dimensions restreintes, n'en sont pas moins terribles.

D'après la théorie généralement admise, les trombes seraient dues à la fois à des actions mécaniques, comme tous les tourbillons en général, et à des actions électriques, comme les orages. Faye exclut cependant toute cause électrique dans sa théorie des tourbillons descendants à axe vertical.

Les trombes terrestres apparaissent en général pendant un orage, sous la forme d'un immense cône d'air et de vapeurs blanchâtres dont la pointe, tournée vers le bas, vient toucher le sol qu'elle creuse dans son rapide mouvement de giration. Ce mouvement de

giration se combine du reste avec un mouvement rapide de translation, et la trombe s'avance avec un bruit intense, lançant la foudre dans tous les sens et broyant tout sur son passage; heureusement ce phénomène a en général peu de durée et se dissipe après un court trajet.

Comme les trombes terrestres, les trombes marines apparaissent pendant les orages; mais souvent aussi elles se forment par un temps calme et par un ciel peu couvert. Leur aspect ne diffère guère d'ailleurs de celui que nous venons de décrire, si ce n'est que la pointe du cône soulève, par suite de l'affouillement qu'elle produit à la surface de la mer, une colonne liquide qui s'élève en bouillonnant autour de cette pointe et qui est entraînée dans le mouvement de giration et de translation de la trombe. Les trombes marines sont plus fréquentes que les trombes terrestres; leur violence est telle qu'elles peuvent engloutir, en un instant, les plus forts navires.

CHAPITRE V

MAGNÉTISME TERRESTRE

777. **Champ magnétique terrestre.** — Nous avons vu (§ 678) que l'orientation d'un aimant sous l'influence de la terre démontrait l'existence d'un champ magnétique terrestre, mais que ce champ terrestre ne pouvait être considéré comme uniforme que dans une région de faible étendue par rapport au rayon terrestre. Il est nécessaire, si l'on veut avoir des notions complètes sur ce champ, de déterminer la direction et l'intensité de la force en chacun de ses points. Les mesures d'intensité étant assez complexes, nous nous occuperons seulement ici de la direction du champ.

L'action du champ terrestre sur l'aiguille aimantée est purement directrice et se réduit à un couple; il suffirait donc, pour avoir la direction de la force en un point du champ, de suspendre en ce point une aiguille aimantée de façon qu'elle fût mobile dans tous les sens autour de son centre de gravité; la direction de l'aiguille dans sa position d'équilibre serait celle du champ en ce point.

Faute de pouvoir pratiquement réaliser ce mode de suspension, on détermine la direction de l'aiguille aimantée par les deux angles dits de *déclinaison* et d'*inclinaison* et c'est aussi par la valeur de ces angles que l'on définit cette même direction.

Rappelons que le *méridien magnétique* d'un lieu est le plan vertical qui passe par la direction du champ magnétique en ce lieu.

L'angle de *déclinaison* en un lieu est l'angle que fait en ce lieu le méridien magnétique avec le méridien géographique; ces deux plans faisant d'ailleurs entre eux deux angles supplémentaires, on considère comme angle de déclinaison celui qui est formé par les deux parties de ces méridiens situées au nord du lieu considéré.

L'angle d'*inclinaison* en un lieu est l'angle que fait en ce lieu la direction positive, c'est-à-dire *sud-nord*, de la force terrestre avec la direction *sud-nord* de l'horizontale contenue dans le même plan c'est-à-dire dans le plan du méridien magnétique.

778. *Mesure de la déclinaison et de l'inclinaison.* — Pour rendre

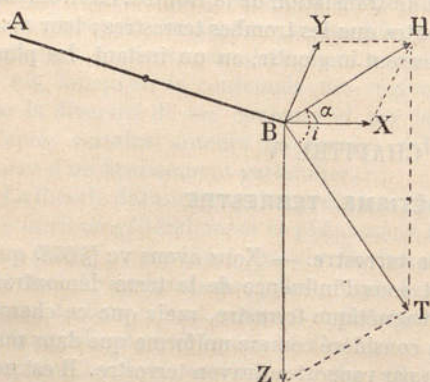


Fig. 464. — Composantes de la force magnétique terrestre.

plus facilement compte des méthodes suivies pour mesurer l'angle d'inclinaison ou l'angle de déclinaison et pour reconnaître plus facilement aussi les forces qui agissent sur l'aiguille aimantée quand on adopte tel ou tel mode de suspension, considérons une aiguille aimantée dans une position quelconque AB (fig. 464), et soit $BT = F$ la direction et la grandeur de la force, due au champ magnétique terrestre, qui agit sur le pôle B. Cette force peut se décomposer en deux autres, situées dans le plan vertical qui contient la force F, c'est-à-dire dans le plan du méridien magnétique, l'une verticale $BZ = z$, l'autre horizontale $BH = H$. On sait d'autre part que l'on a :

$$\begin{aligned} z &= F \sin i, \\ H &= F \cos i, \end{aligned} \quad (1)$$

en désignant par i l'angle de BT avec l'horizontale BH ou l'angle d'*inclinaison*. La force BH peut elle-même être décomposée en deux autres forces situées dans le même plan horizontal, l'une $BX = x$

contenue dans le même plan vertical que l'aiguille AB, l'autre BY = y perpendiculaire à ce plan. Si l'on désigne par α l'angle des deux plans verticaux BXZ et BHZ, c'est-à-dire l'angle du plan vertical qui contient l'aiguille avec le plan du méridien magnétique, on aura :

$$x = H \cos \alpha = F \cos i \cos \alpha, \quad (2)$$

$$y = H \sin \alpha = F \cos i \sin \alpha. \quad (3)$$

Or ce que nous venons d'établir pour un pôle s'applique exactement à l'autre; on peut donc considérer l'aiguille comme soumise à trois couples x , y , z .

Si l'aiguille aimantée est seulement mobile autour d'un axe vertical, elle n'est soumise qu'aux actions des composantes horizontales et doit par conséquent se placer dans le plan du méridien magnétique. Dans ce cas, $\sin \alpha$ est égal à 0, la composante y est donc nulle et la composante x , qui est dirigée suivant le prolongement de l'aiguille même, est égale à H .

Lorsque, au contraire, l'aiguille est seulement mobile autour d'un axe horizontal, dans un plan vertical BXZ faisant avec le méridien magnétique un angle α , les seules forces auxquelles cette aiguille est soumise sont les composantes x et z contenues dans le plan dans lequel a lieu le déplacement; l'aiguille prendra donc la direction de la résultante de ces composantes. Si, en particulier, $\alpha = 0$, c'est-à-dire si l'aiguille est mobile dans le plan du méridien magnétique, on a $x = H$; par suite la résultante de z et de x est alors BT et l'angle que fait l'aiguille avec l'horizontale menée dans son plan est précisément l'angle d'inclinaison. Lorsque, au contraire, $\alpha = 90^\circ$, on a $x = 0$ et la seule force qui agisse sur l'aiguille est alors la composante z ; l'aiguille se dirigera dans ce cas suivant cette composante, c'est-à-dire verticalement.

779. **Boussole de déclinaison.** — Elle consiste, dans ses parties essentielles, en un théodolite qui permet de déterminer par une opération astronomique la direction du méridien géographique, et en une aiguille aimantée mobile dans un plan horizontal et dont la position d'équilibre indique, comme nous venons de le démontrer, la direction du méridien magnétique. Une simple lecture sur un cercle gradué donne l'angle de ces deux directions, c'est-à-dire la déclinaison cherchée.

Il faut remarquer toutefois que, dans les barreaux ou dans les aiguilles aimantées, l'axe de figure ou *ligne de foi* ne coïncide pas

en général exactement avec la ligne des pôles. On commet donc une erreur en prenant, pour la direction du méridien magnétique, la direction de la ligne de foi et il faut, si l'on veut éliminer cette erreur, opérer par retournement, c'est-à-dire faire deux lectures en retournant l'aiguille face pour face et prendre la moyenne; la ligne de foi se trouve alors successivement de part et d'autre de la ligne des pôles et les deux erreurs égales mais de sens inverses se compensent.

780. **Boussole d'inclinaison.** — Elle consiste en une aiguille aimantée mobile autour d'un axe horizontal passant exactement par le centre de gravité de l'aiguille et par le centre de figure d'un limbe vertical gradué. Le plan du limbe et celui dans lequel peut se déplacer l'aiguille sont parallèles, et le limbe permet de déterminer à chaque instant l'angle que fait avec l'horizontale la direction de l'aiguille aimantée. De plus, le limbe et l'axe de l'aiguille sont eux-mêmes mobiles autour d'un axe vertical, ce qui permet de donner aux plans du limbe et de l'aiguille telle direction que l'on désire par rapport au méridien magnétique; un cercle horizontal gradué indique à chaque instant la position du limbe vertical.

Si l'on a préalablement déterminé la direction du méridien magnétique avec une boussole de déclinaison et que l'on oriente le plan du limbe dans celui de ce méridien, l'angle que fait l'aiguille avec l'horizontale donne immédiatement la valeur de l'inclinaison cherchée. En réalité il faut effectuer toute une série de lectures et d'opérations pour éliminer les diverses causes d'erreurs qui peuvent provenir, soit, comme nous l'avons déjà indiqué à propos de la déclinaison, d'un défaut de coïncidence entre la ligne de foi et la ligne des pôles, soit encore d'un défaut de coïncidence entre l'axe de rotation de l'aiguille, son centre de gravité et le centre de figure du limbe.

Si l'on ne connaît pas la direction du méridien magnétique, on peut la déterminer avec la boussole d'inclinaison elle-même. Il suffit pour cela de faire tourner le limbe, autour de son axe vertical, jusqu'à ce que l'aiguille soit verticale; le plan dans lequel cette aiguille est mobile et par suite celui du limbe sont alors perpendiculaires au méridien magnétique.

781. **Variations de la déclinaison et de l'inclinaison.** — Les valeurs de la déclinaison et de l'inclinaison varient d'un point à l'autre du globe et d'un moment à l'autre en un même point de la terre.

La déclinaison est dite *orientale* ou *occidentale* suivant que le pôle nord de l'aiguille aimantée est à l'est ou à l'ouest du méridien

magnétique; l'inclinaison est dite *positive* ou *negative* suivant que le pôle nord est au-dessus ou au-dessous de l'horizontale.

Pour avoir une idée d'ensemble sur la valeur de la déclinaison aux divers points du globe, on porte ces valeurs sur une mappemonde et l'on joint par une ligne tous les points d'égale déclinaison d'une part; tous les points d'égale inclinaison, d'autre part; on obtient ainsi les lignes appelées *isogones* et *isoclines*.

Il existe deux points du globe situés, l'un par 72° de latitude nord et 97° de longitude occidentale, l'autre par 76° de latitude sud et 154° de longitude orientale, où l'inclinaison est de 90° , c'est-à-dire où l'aiguille d'inclinaison en équilibre est verticale; l'extrémité nord de l'aiguille aimantée est d'ailleurs dirigée vers le bas au premier de ces points, vers le haut au second. Ces points sont les deux *pôles magnétiques* terrestres; la direction du champ magnétique terrestre y est verticale et la terre n'y exerce aucune action sur l'aiguille de déclinaison.

Les isogones sont assez irrégulières; celles pour lesquelles la valeur de la déclinaison est faible ont grossièrement la forme de grands cercles qui passeraient par les deux pôles magnétiques. L'isogone qui correspond à une valeur nulle de la déclinaison divise la surface du globe en deux parties, l'une dans laquelle se trouvent l'Europe occidentale et l'Afrique et où la déclinaison est occidentale, l'autre qui comprend la région du Pacifique et où la déclinaison est orientale. Si l'on se déplace de l'est à l'ouest sur le parallèle de Paris en partant du point où ce parallèle rencontre l'isogone 0° en Russie, la déclinaison occidentale augmente progressivement de 0° à 34° environ, valeur qu'elle présente au milieu de l'Atlantique, puis diminue, s'annule sur l'isogone 0° en Amérique, devient orientale, augmente, passe par un maximum voisin de 25° , diminue et s'annule de nouveau en Russie ⁽¹⁾.

Les isoclines ont grossièrement la forme de grands cercles rapportés à un axe passant par les deux pôles magnétiques et par conséquent légèrement incliné sur l'axe terrestre. A mesure que l'on s'écarte de l'un des pôles pour s'approcher de l'autre, l'inclinaison magnétique diminue, devient nulle, puis change de signe et augmente de nouveau en valeur absolue. La ligne d'inclinaison nulle a

(1) En réalité la déclinaison s'annule 4 fois sur le parallèle de Paris parce qu'il existe, au Japon et en Chine, une isogone fermée de déclinaison nulle qui est coupée par ce parallèle, et dont nous n'avons pas tenu compte afin de donner une idée plus générale de la distribution des déclinaisons.

reçu le nom d'*équateur magnétique*: elle divise la surface du globe en deux régions, l'une dans laquelle l'inclinaison est positive, l'autre dans laquelle l'inclinaison est négative.

La déclinaison et l'inclinaison subissent en un même lieu des variations avec le temps; certaines de ces variations présentent un caractère périodique, d'autres au contraire semblent irrégulières et accidentelles.

Variations périodiques. — Les variations périodiques sont de deux sortes, les unes, à longue période, constituent les *variations séculaires*, les autres, à courte période, les *variations diurnes*.

On peut se représenter les variations séculaires en attribuant à l'axe magnétique un mouvement de rotation autour de l'axe terrestre, mouvement qui mettrait 900 ans à s'accomplir et s'effectuerait de telle sorte qu'un observateur, placé au pôle nord terrestre, verrait le pôle magnétique tourner autour de lui dans le sens des aiguilles d'une montre. L'axe magnétique, en se déplaçant, entraîne avec lui les lignes isogones et isoclines et, suivant que le pôle nord magnétique passe d'un côté ou de l'autre du méridien d'un lieu, la déclinaison en ce lieu devient occidentale ou orientale.

Les variations diurnes portent surtout sur la déclinaison, mais les déplacements de l'aiguille sont toujours très faibles. Deux fois par vingt-quatre heures, l'aiguille se déplace légèrement de l'est vers l'ouest et deux fois pendant le même temps elle revient de l'ouest vers l'est. L'heure des positions extrêmes varie d'un point du globe à l'autre. Les oscillations sont plus marquées le jour que la nuit, l'été que l'hiver. Elles paraissent en relation avec le mouvement apparent du soleil, de la lune, etc., mais on n'en connaît pas encore les lois.

Variations accidentelles. — Enfin on observe de temps à autre, en un même lieu, des mouvements irréguliers de l'aiguille aimantée: l'aiguille se déplace d'une façon saccadée vers l'est ou vers l'ouest, s'écarte parfois notablement de sa position d'équilibre et y revient au bout de quelques heures après avoir oscillé dans tous les sens.

Ces perturbations magnétiques, qui se font sentir d'ordinaire sur des régions étendues, se produisent simultanément en tous les points qu'elles atteignent; elles sont surtout marquées pendant les aurores polaires, mais leur cause première est encore inconnue.

FIN.

TABLE.

TABLE DES MATIÈRES

DU TOME SECOND

LIVRE IV

OPTIQUE

	Pages.		Pages.
Généralités	529	I. <i>Propagation des radiations lumineuses</i>	697
I. OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE.....	531	II. <i>Intensité et composition des radiations lumineuses émises par les différentes sources</i>	697
CHAP. I. Propagation de la lumière.....	531	CHAP. II. Radiations calorifiques.....	725
CHAP. II. Réflexion de la lumière.....	536	I. <i>Propagation des radiations calorifiques</i>	725
I. <i>Généralités. Lois de la réflexion</i>	536	II. <i>Intensité et composition des radiations calorifiques émises par les différentes sources</i>	729
II. <i>Miroirs plans</i>	539	CHAP. III. Radiations chimiques.....	745
III. <i>Miroirs sphériques</i>	549	CHAP. IV. Effets et transformations des radiations.....	749
CHAP. III. Réfraction.....	572	III. OPTIQUE PHYSIQUE.....	767
I. <i>Réfraction de la lumière à travers les surfaces planes</i>	579	CHAP. I. Interférences de la lumière.....	767
II. <i>Réfraction de la lumière à travers les surfaces courbes</i>	589	CHAP. II. Diffraction.....	778
CHAP. IV. Instruments d'optique.....	647	CHAP. III. Polarisation et double réfraction.....	783
I. <i>Appareils de projection</i>	652	CHAP. IV. Polarisation chromatique.....	795
II. <i>Loupe et microscope</i>	654	CHAP. V. Polarisation rotatoire.....	800
III. <i>Lunettes et télescopes</i>	672		
CHAP. V. Dispersion.....	679		
II. ETUDE DES RADIATIONS ...	692		
Généralités sur les radiations.....	692		
CHAP. I. Radiations lumineuses.....	697		

LIVRE V

ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME

CHAP. I. Phénomènes généraux de l'électricité.....	827	CHAP. III. Condensateurs électriques.....	854
CHAP. II. Du potentiel électrique.....	842	CHAP. IV. Machines électrostatiques. Effets des décharges électriques.....	869

	Pages.		Pages.
CHAP. V. De la pile et du courant électrique.....	885	II. Tubes de Geissler et de Crookes.....	997
CHAP. VI. Actions calorifiques des courants et piles thermo-électriques.....	905	III. Rayons X.....	1002
CHAP. VII. Actions chimiques produites par les courants et actions chimiques dans les piles. Phénomènes électro-capillaires.....	916	CHAP. XI. Phénomènes divers. Oscillations électriques. Courants alternatifs de haute fréquence.....	1010
CHAP. VIII. Magnétisme. Electro-magnétisme et électrodynamique.....	938	CHAP. XII. Unités et mesures des grandeurs électriques..	1019
CHAP. IX. Induction.....	963	A. Unités.....	1019
CHAP. X. Eclairage électrique. Tubes de Geissler et de Crookes. Rayons X.....	993	B. Mesures.....	1025
1. Eclairage électrique....	993	I. Mesure des intensités..	1025
		II. Mesure des quantités d'électricité.....	1036
		III. Mesure des résistances..	1037
		IV. Mesure des différences de potentiel et des forces électromotrices.....	1043

LIVRE VI

MÉTÉOROLOGIE

CHAP. I. Température de l'air, du sol et des mers.....	1048	CHAP. III. Humidité atmosphérique.....	1065
CHAP. II. Pression barométrique. Vents.....	1057	CHAP. IV. Electricité atmosphérique.....	1072
TABLE DES MATIÈRES DU TOME II.....		CHAP. V. Magnétisme terrestre..	1081
TABLE ALPHABÉTIQUE DES MATIÈRES.....			1087
			1089

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

TABLE ALPHABÉTIQUE.

TABLE ALPHABÉTIQUE DES MATIÈRES

A

- ABERRATION** de sphéricité dans les miroirs sphériques, 568; — longitudinale, 568; — latérale, 569; — de sphéricité dans les dioptries simples, 603; — longitudinale, 603; — latérale, 603; — de sphéricité dans les lentilles sphériques, 643; — de réfrangibilité dans les lentilles, 689.
- ABSORPTION** des gaz par les liquides, 279; — des gaz par les solides, 283; — de la lumière, 715; spectres d' —, 718, voy. *Spectre*; — de la chaleur, 740; — des radiations chimiques, 748.
- ACCÉLÉRATION** d'un mouvement varié, 9; — d'un mouvement uniformément varié, 10; unité d' —, 42; — de la pesanteur, voy. *g*; dimension de l'unité d' —, 1023.
- ACCOMMODATION**, 648.
- ACCUMULATEURS**, principe des —, 923; description des —, 930; — Planté, 930; charge d'un —, 932; décharge d'un —, 933.
- ACHROMATIQUES** (Objectifs), 463.
- ACHROMATISME** des prismes, 686; — des lentilles, 690.
- ACIDE CARBONIQUE** (Liquéfaction de l'), 380, 382.
- ACIDE SULFUREUX** (Liquéfaction de l'), 380.
- ACIDE TARTRIQUE** (Pouvoir rotatoire de l'), 812, 816.
- ACOUSTIQUE**, 439, tubes —, 460; cornet —, 460.
- ACTINOMÈTRE**, 1049; — de Crova, 1050.
- ACTION** rectiligne des forces, 39; égalité de l' — et de la réaction, 39.
- ACTIONS CALORIFIQUES** des radiations, 750; — produites par les rayons cathodiques, 1001.
- ACTIONS CAPILLAIRES**, voy. *Capillarité*.
- ACTIONS CATAPHORIQUES**, 937.
- ACTIONS CHIMIQUES** des radiations, 751; — produites par les courants, 916; — à l'intérieur des piles, 923.
- ACTIONS MÉCANIQUES** produites par les rayons cathodiques, 1002.
- ACTIONS MOLÉCULAIRES** dans les solides, 94; causes qui modifient les — dans les solides, 116; — entre solides, 118; — dans les liquides, 171; — dans les gaz, 242; — réciproques des gaz, 273; — entre gaz et liquides, 273; — entre gaz et solides, 273.
- ACTIVES** (Substances), 804.
- ADHÉSION**, 118.
- AÉRODYNAMIQUE**, 237.
- AÉROSTATIQUE**, 213; vérification expérimentale des principes de l' —, 215.
- AÉROSTATS**, 235.
- AGENTS RÉVÉLATEURS**, 753, 756.
- AGRETTE** électrique, 883.
- AGUILLE** thermo-électrique, 915; — aimantée, 939.
- AIMANT** naturel et artificiel, 938; — en fer à cheval, 939; pôles des —, 939; points conséquents des —, 940; constitution des —, 943; — Jamin, 945; définition précise

- des pôles d'un —, 948; égalité des deux magnétismes d'un —, 948; moment d'un —, 949; action des courants sur les —, 950; action des — sur les courants, 951; loi des actions réciproques entre les — et les courants, 953; action d'un — sur un solénoïde, 958; — artificiels, 959; induction par les —, 964; emploi d'un — pour la radiographie, 1006.
- AIMANTATION par influence, 913; procédés d'—, 944; — par simple touche, 944; — par double touche séparée, 944; — par les courants, 958.
- AIR, poids d'un centimètre cube d'— sec à 0° et à 76^m, 343; poids d'un volume déterminé d'— humide, 395; température de l'—, 1048, voy. *Température*; humidité de l'—, 1065.
- AIR COMPRIMÉ, applications de l'—, 273; machines à —, 273; tramways à — 273; horloges à —, 273; bains d'—, 273.
- ALCOOMÈTRE centésimal, 150; — à indications pondérales, 151.
- ALIZÉS, 1060.
- ALLONGEMENT, coefficient d'— linéaire, 98.
- ALLOTROPIQUES, transformations — provoquées par les radiations, 751.
- ALTERNATIFS, courants —, 971; courants — de haute fréquence, 1016.
- ALTITUDE, correction barométrique relative à l'—, 229; mesure de l'— au moyen du baromètre, 230; influence de l'— sur la température de l'air, 751, 1053.
- AMORTISSEMENT des galvanomètres, 1030.
- AMPÈRE, 892, 1022.
- AMPÈREMÈTRES, principe des —, 1026; description des — 1034; — d'Arsonval-Gaiffe, 1035.
- AMPLITUDE d'un mouvement vibratoire, 15; diminution de l'— des vibrations d'un corps sonore, 451; relation entre l'intensité et l'— d'un mouvement vibratoire sonore, 475, lumineux, 769.
- ANALYSE des sons, 513, voy. *Sons*; — de la lumière, 679.
- ANALYSE SPECTRALE, 711; manière de rendre les gaz et les vapeurs incandescents pour l'—, 712.
- ANALYSEUR, 786.
- ANAPNOGRAPHE de Bergeon et Kastus, 240.
- ANCHES battantes, 501; — libres, 501; — en dedans, 502; — en dehors, 502.
- ANÉLECTRIQUE, 833.
- ANÉMO-CALORIMÈTRE de d'Arsonval, 241, 882.
- ANÉMOMÈTRE à godets, 240; — à ailettes, 240.
- ANGLE de torsion, 107; — de raccordement d'un liquide et d'un solide, 184; emploi des miroirs tournants pour la mesure des —, 543; — de déviation d'un prisme, 585; — de polarisation, 787; — de calage des balais dans la machine Gramme, 984.
- ANGLE LIMITE, 575.
- ANGLE VISUEL, 649.
- ANISOTROPES (*Corps*), élasticité dans les —, 107; conductibilité calorifique des — 403; réfraction dans les —, 788, voy. *Double réfraction*.
- ANNEAU de S'Gravesande, 292; — oculaire du microscope composé, 662; — oculaire d'une lunette, 675; — de Newton, 776; — Gramme, 980.
- ANODE, 916.
- ANOMALE (Dispersion), 680.
- ANTIPRINCIPAL, plan —, voy. *Plan*; point —, voy. *Point*.
- APÉRIODIQUES (Galvanomètres), 1030.
- APLANÉTISME dans les miroirs, 569; — dans les dioptrés, 603.
- APPAREIL de Poiseuille pour l'écoulement des liquides, 169; — de Dalton, 361, de Regnault, 361, 363, et de Gay-Lussac, 363, pour la mesure des tensions maxima de vapeurs; — Cailletet, pour la liquéfaction des gaz, 381; — d'In-

- genbousz, pour l'étude de la conductibilité des solides, 402; — calorimétrique de Regnault, 415 — de Berthelot, pour la mesure des chaleurs de vaporisation, 426; — de Kœnig, pour l'interférence des sons, 465; — de Kœnig, pour l'analyse des sons, 521.
- APPAREILS DE PROJECTION, grossissement des —, 651, 652; principe des —, 652; objectif des —, 652; système éclairant des —, 653.
- APPARENT (Diamètre), 650.
- ARCHIMÈDE, principe d'—, 133; application du principe d'— aux gaz, 215, 217, 234.
- ARC (Lampes à), 994.
- ARC-EN-CIEL, 1070.
- ARC MULTIPLE (Résistance d'un), 903.
- ARÉOMÈTRE, méthode des —, 143; — de Nicholson, 144; — de Fahrenheit, 145; — de Baumé, 148; — de Cartier, 148; influence des actions capillaires sur l'équilibre des —, 198.
- ARGENTURE, 919.
- ARMATURES des condensateurs, 859.
- ARSONVAL, expériences de d'—, sur les courants alternatifs de haute fréquence, 1016.
- ASCENSIONNELLE (Force), 235.
- ASTIGMATIQUE, réfraction — régulière, 604.
- ASTIGMATISME, 607.
- ASTRONOMIQUE (Lunette), 674.
- ASYMÉTRIQUE (Carbone), 807; voy. *carbone asymétrique*.
- ATHERMANES (Corps), 743.
- ATMOLYSE, 289.
- ATTRACTIONS, loi des — électriques, 829; loi des — magnétiques, 941.
- ATMOSPHÈRE, 230; rôle de notre — dans le refroidissement du globe, 745; quantité de chaleur absorbée par notre —, 751; mouvements de l'—; voy. *vents*; humidité de l'—, 1065.
- ATMOSPHÉRIQUE, pression —, voy. *Pression*; humidité —, 1065; électricité —, 1072, voy. *Electricité atmosphérique*; champ électrique —, 1072.
- AURORES polaires, 1080; — boréales et australes, 1080.
- AUSTRALES (Aurores), 1080.
- AUTOCLAVES, 369.
- AVERTISSEUR D'ANSELL, 287.
- AXE d'un couple, 23; — principal et — secondaire d'un miroir sphérique, 549; — principal et — secondaire d'un dioptré, 590; — principal d'un système sphérique centré, 607; — principal et secondaire des lentilles minces, 624; — optique d'une lunette, 675; — cristallographique, 789; — optique d'un cristal, 789; lames parallèles à l'— optique, 795; lames perpendiculaires à l'—, 800; — magnétique, 941.

B

- BALANCE, 77; principe de la — de laboratoire, 77; justesse de la —, 78; commodité de la —, 79; sensibilité de la —, 79; description de la —, 80; — à cavaliers, 84; — de Curie, 85; — de Roberval, 85; — romaine, 85; — hydrostatique, 137; — de Mohr, 140; — de Coulomb, 829.
- BALAIS de la machine Gramme, 984; angle de calage des —, 984; — à calage variable, 984.
- BALANCIER, 112.
- BANC DE MELLONI pour l'étude des radiations calorifiques, 727.
- BANDES (Spectres de), 710.
- BAROMÈTRE, influence des actions capillaires sur la hauteur du —, 199; — à mercure, 219; remplissage du tube du —, 219; — normal, 221; — ordinaire à cuvette, 222; — à goutte, 222; — de Fortin, 222; — à glycérine, 225; — ordinaire à siphon, 225; — de Gay-Lussac, 226; — à cadran, 227; mesure de l'altitude au moyen du — 230; — métalliques, 231; — anéroïde de Vidi, 231; —

- de Bourdon, 232; — enregistreurs, 232; — à mercure à enregistrement photographique, 232; — statique, 232; — métallique enregistreur de Richard, 233; — tronqué, 263.
- BAROMÉTRIQUE, pression —, voy. *Pression*; correction — relative à la capillarité, 227, à la température, 228, à l'altitude et à la latitude, 229.
- BAROSCOPE, 217.
- BARREAU aimanté, 939.
- BATTEMENTS, 473.
- BATTERIE en surface ou en quantité, 864; — en cascade, 865; groupement des électromoteurs en —, 898.
- BÉMOL, 480.
- BICYLINDRIQUES (Lentilles), 645.
- BIFILAIRE (Suspension), 851.
- BLANCHIMENT électrique, 919.
- BINOME de dilatation, 298.
- BINOCULAIRE (Microscope), 672.
- BIPRISME de Fresnel, 769.
- BICQUARTZ, 816.
- BINÉFRINGENTS (Corps), 788.
- BOBINE DE RUHKORFF. Voy. *Bobine d'induction*.
- BOBINE D'INDUCTION, 985; cloisonnement des —, 986; condensateur des —, 987; interrupteur à mercure de Foucault pour les —, 987; emploi des — en physiologie et en médecine, 988; trembleurs des — médicales, 988; graduation de l'intensité du courant induit dans les — médicales, 989.
- BOÎTES d'oculististes, 637; — de résistance, 1037.
- BOLOMÈTRE de Langley, 725, 1042.
- BOMBARDERMENT, théorie du — moléculaire, 999.
- BORÉALES (Aurores), 1080.
- BOUGIE décimale, 700.
- BOURRASQUES, 1062.
- BOUSSOLE, principe des —, 1026; — des tangentes, 1028; — de déclinaison, 1083; — d'inclinaison, 1084.
- BOUTEILLE DE LEYDE, 861; — démontable, 868.
- BOUTEILLE DE LANE, 880.
- BRAS DE LEVIER (d'un couple), 23.
- BRISE de mer, 1061; — de terre, 1061.
- BROUILLARDS, 1067.
- BRUTS et SONS musicaux, 442.
- BRÛLE-CIRCUIT, 997.
- BUYS-BALLOT (Règle de), 1063.

C

- CALAGE, angle de — des balais de la machine Gramme, 984; balais à — variable, 984.
- CALÉFACTION, 373.
- CALMES équatoriaux, 1060; — tropicaux, 1060.
- CALORIE-GRAMME-DEGRÉ, 408.
- CALORIE-KILOGRAMME-DEGRÉ, 408.
- CALORIFÈRES à air chaud, 407; — à eau chaude, 407.
- CALORIFIQUES (Radiations), 725, voy. *Radiations*.
- CALORIMÈTRE de Bunsen, 411; — de Regnault, 415; — de Berthelot, 417.
- CALORIMÉTRIE, 407; méthode du puits de glace, 410; méthode des mélanges, 412; méthode du refroidissement, 413; loi de Dulong et Petit, 421; loi de Neumann et Dulong, 422; loi de Wœstyn, 423.
- CANDLE, 700.
- CAPACITÉ CALORIFIQUE, 410.
- CAPACITÉ ÉLECTROSTATIQUE, 854; unité de —, 855; unité électromagnétique C. G. S. de —, 1021; unité pratique de —, 1022; mesure des —, 1047.
- CAPILLAIRES, tubes —, voy. *Tubes*; théorie élémentaire des phénomènes —, 189; chapelets —, 194; électromètre — de Lippmann, 935.
- CAPILLARITÉ, 182; phénomènes dus à la —, 184; lois expérimentales de la —, 187; théorie élémentaire de la —, 189; suspension d'un liquide dû à la —, 191; mouvements des liquides dus à la —, 195; mouvements des solides dus à la —,

- 196; influence de la —, sur l'équilibre des aëromètres, 198; influence de la —, sur les hauteurs barométriques ou manométriques, 199; correction barométrique, relative à la —, 227.
- CAPSULE manométrique, 465.
- CARBONE ASYMÉTRIQUE et pouvoir rotatoire, 807; nombre d'isomères dans le cas où la molécule contient plusieurs —, 808; cas de plusieurs — réunis par liaison simple, 810; cas où la formule est symétrique, 811.
- CARCEL, 699.
- CARDAN (suspension à la), 224.
- CARDINAUX (Points et plans), voy. *Points et Plans*.
- CARNOT (Principe de), 435.
- CASCADE (Batterie en), 865.
- CATAPHORIQUES (Actions), 937.
- CATHÉTOMÈTRE, 97.
- CATHOLIQUES (Rayons), voy. *Rayons*.
- CAUSTIQUES dans les miroirs sphériques, 568; — dans les dioptrés simples, 603.
- CENTIGRADE (Échelle), 295.
- CENTRE des forces parallèles, 23; — des moments, 25; — de basse pression, 1062.
- CENTRE DE COURBURE d'un miroir sphérique, 549; — d'un dioptré, 590.
- CENTRE DE GRAVITÉ, 23, 54; détermination du — d'un corps, 89; variation du pouvoir rotatoire avec la position du — du tétraèdre représentatif d'une molécule, 813.
- CENTRE OPTIQUE des lentilles, 622.
- CENTRIFUGE (Force), 92.
- CENTRIPÈTE (Force), 92.
- CERCLE répéteur à réflexion de Borda, 545.
- CHALEUR, 291; phénomènes généraux produits par la —, 292; dilatation des corps par la —, 292; accroissement des forces élastiques intérieures sous l'influence de la —, 294; propagation de la —, 397; quantité de —, 407; sources de —, 432, 438; transformation de la — en travail et réciproquement, 432; équivalent mécanique de la —, 434; — développée par un courant, loi de Joule, 905; — produite par les rayons cathodiques, 1001.
- CHALEUR DE FUSION ou de solidification, 424.
- CHALEUR DE VAPORISATION, 425; résultats relatifs à la —, 427; — totale, 427.
- CHALEUR RAYONNANTE, 725, voy. *Radiations*; banc de —, 727.
- CHALEUR SPÉCIFIQUE, 409, voy. *Calorimétrie*; — des gaz, 419; résultats relatifs aux —, 419; — d'un gaz sous pression constante, 419, 420; — d'un gaz sous volume constant, 419, 420; rapport des deux — des gaz, 419.
- CHAMBRE CLAIRE de Nachet, 668.
- CHAMBRE NOIRE, images données par la —, 534; — photographique, 755.
- CHAMP de visibilité d'un miroir plan, 540; — de vision d'un miroir plan, 540; — du microscope composé, 660; lentille de — du microscope composé, 662; — plat d'un objectif, 755.
- CHAMP ÉLECTRIQUE, 842; intensité du —, 842; — uniforme, 842; — atmosphérique, 1072.
- CHAMP MAGNÉTIQUE, 946; intensité du —, 946; — terrestre, 948, 1081; — dû à un courant, 950; rotation du plan de vibration de la lumière polarisée dans un —, 1011.
- CHANGEMENTS D'ÉTAT, 346.
- CHAPELETS capillaires, 194.
- CHARGE électrique, 831; — résiduelle d'un condensateur, 859; — d'un accumulateur, 932.
- CHASSIS-PRESSE, 758.
- CHEMINÉES (Tirages des), 406.
- CHEMINÉES-CALORIFÈRES, 406.
- CHEPHEUR des télescopes, 678.
- CHIMIQUES, radiations —, voy. *Radiations*; actions —, voy. *Actions chimiques*.
- CHROMATIQUE (Polarisation), voy. *Polarisation*.

- CHRONOGRAPHE**, diapason —, 508; — de Marey, 509.
CHRONOPHOTOGRAPHIE, 760.
CHUTE des corps, 89; — des liquides, 153.
CINÉMATIQUE, 7.
CIRRUS, 1068.
CLARTÉ d'une lunette, 674.
CLEF de circuit, 1040.
CLICHÉ, 757.
CLOISONNEMENT des bobines d'induction, 986.
COEFFICIENT d'allongement ou de compressibilité linéaires, 98; — d'élasticité, 99; — de compressibilité cubique, 102; — de ténacité absolue, 113; — de compressibilité des liquides, 171; — de solubilité, 201; — de diffusibilité, 208; — de frottement intérieur des liquides, 170, des gaz, 242; — de solubilité des gaz, 280; — de diffusibilité des gaz, 285; — moyen de dilatation cubique, 298; — moyen de dilatation superficielle et linéaire, 299; — moyen de dilatation absolue et de dilatation apparente, 302; détermination expérimentale des — de dilatation, 302; — de dilatation des gaz sous pression constante, et sous volume constant, 318; — de conductibilités intérieure et extérieure, 399; — de dispersion, 685; — de dispersion partielle, 686; — de transmission de la lumière, 716; — de transmission de la chaleur, 743; — de transmission des radiations chimiques, 748; — de conductibilité électrique, 894.
COERCITIVE (Force), 944.
COHÉSION, 94.
COIN (Équilibre du), 33.
COLLECTEUR d'un condensateur, 859; — de la machine Gramme, 983.
COLLIMATEUR, 705.
COLLOÏDES, 209.
COLOMBIN, 997.
COLORATION des lames minces, 777, voy. *Lames*.
COLORIMÉTRIE, 719.
COMBINAISONS chimiques provoquées par les radiations, 752.
COMMA, 480.
COMPARATEUR pour la mesure du coefficient de dilatation linéaire, 307; — optique de Lissajoux, 492;
COMPENSATEUR de Soleil et de Duboscq, 817.
COMPOSANTE NORMALE des enveloppes flexibles courbes et tendues, 103; — de la tension superficielle, 178.
COMPOSITION des radiations émises par les différents sources, 704; — de la lumière réfléchie, 714, diffusée, 715, transmise, 717; — des radiations calorifiques émises par les différents corps, 737; — de la chaleur réfléchie, 738, diffusée 740, absorbée 741, transmise 743; — des radiations chimiques émises par les différentes sources, 747; — des radiations chimiques réfléchies, 747, diffusées, 747, absorbées, 748, transmises, 748.
COMPOUND (Dynamo), 975.
COMPRESSIBILITÉ, coefficient de — linéaire, 98; coefficient de — cubique, 102; coefficient de — des liquides, 171; expériences d'Oersted, 172, de Colladon et Sturm, de Regnault et de Grassi, 173, de Jamin, Amaury et Descamps, 174, de Cailletet, 175, sur la — des liquides; — des gaz, 214, 242; inégale — des gaz, expériences de Faraday, Oersted, Despretz, Pouillet, 245; expériences de Dulong et Arago, 246, de Regnault, 247, sur la — de l'air; expériences récentes sur la — des gaz, 250.
COMPRESSION, 96; variations de volume pendant la —, 101; — s'exerçant sur toute la surface, 102; liquéfaction par —, 379; liquéfaction par — et par refroidissement, 380.
COMPTE-GOUTTES, 192.
COMPTEURS d'électricité, 1036.
CONDENSANTE, onde —, 445; force —, 858.
CONDENSATEURS électriques, 856; —

- sphérique, 856; collecteur des —, 859; condenseur des —, 859; armature des —, 859; charge résiduelle d'un —, 859; forme usuelle des —, 860; — d'Œpinus, 861; — étalons de capacité, 861; électroscope — 861; groupement des —, 863; décharge d'un —, 867, voy. *Décharge*; — des bobines d'induction, 987.
- CONDENSATION des tranches gazeuses pendant la propagation d'un mouvement vibratoire dans un tuyau, 446; — électrique, 856.
- CONDENSEUR des machines à vapeur, 429; — d'un condensateur, 859.
- CONDUCTIBILITÉ CALORIFIQUE, 397; coefficient de — intérieure, 399; extérieure, 399; hypothèse de Fourier sur la —, 393; cas d'un mur homogène indéfini, 399; cas d'une barre longue de petit diamètre, 400; résultats relatifs à la —, 403; application de la — 403.
- CONDUCTIBILITÉ ÉLECTRIQUE, voy. *Résistance électrique*; coefficient de —, 894.
- CONDUCTEURS, bons ou mauvais — de la chaleur 403, de l'électricité, 827; distribution de l'électricité dans les bons et les mauvais —, 831; — à deux et à trois dimensions, 904; élévation de température des —, traversés par un courant, 908.
- CONDUCTION, voy. *Conductibilité calorifique*.
- CONDUCTIVE (Décharge), 882.
- CONJUGUÉS (Foyers), voy. *Foyers conjugués*.
- CONTACT, électrisation par —, 835; force électromotrice de —, 887; loi des — successifs, 887.
- CONTINGENTES (Radiations), 754.
- CONSÉQUENTS, points — des aimants, 940, 959.
- CONSERVATION de la matière, 4; — de l'électricité, 841.
- CONSONNANCE, 477.
- CONSTANTE diélectrique, 859; — galvanométrique, 1027.
- CONSTITUTION DES CORPS (Relation entre le pouvoir rotatoire et la), 805.
- CONTACT, tension superficielle sur les surfaces de —, 182, 183; différence de potentiel au — de deux métaux, 886; force électromotrice de —, 887; loi des — successifs, 887.
- CONVECTION, 299, 397, 398, 405; phénomènes dépendant de la —, 406.
- CONVERGENT, dioptré —, voy. *Dioptré*; système —, voy. *Système sphérique centré*; lentille —, voy. *Lentille*.
- CORDES, 503; loi des vibrations transversales des —, 503; nœuds et ventres des — vibrantes, 505; vibrations longitudinales des —, 506.
- CORNET acoustique, 460.
- CORPS gènes, 27; — solides, voy. *Solides*; — liquides, voy. *Liquides*; — gazeux, voy. *Gaz*; loi de l'élasticité de traction dans les — inorganiques, 97, dans les — organiques, 99; — flottants, 134; — photogènes, 529; — transparents, 531, 716; — translucides, 531; — opaques, 531, 716; — magnétiques 945; — diamagnétiques, 945.
- CORPUSCULES (Couronnes irisées produites par des), 783, 1072.
- CORRECTION (Objectifs à), 664.
- COULEUR des corps, 714, 717; influence de la — des étoffes sur leur température, 751; photographie des —, 759, 777; — des lames minces, 774, voy. *Lames*.
- COULOMB, 831, 1022.
- COUPLE de rotation, 12, 23; composition et décomposition des —, 23.
- COUPLES HYDRO-ÉLECTRIQUES, voy. *Éléments et Piles*.
- COUPLES THERMO-ÉLECTRIQUES, voy. *Éléments et Piles*.
- COURANT liquide, voy. *Écoulement des liquides*; — gazeux, voy. *Écoulement des gaz*.
- COURANT (électrique), 869; condition générale de production d'un —, 887; sens et intensité d'un —, 891; — dérivés, 901; lois de Kirchoff, 902; action calorifique des —, loi de Joule, 905; élévation de température des conducteurs traversés

- par un —, 908; — thermo-électriques, 910; inversion des — thermo-électriques, 911; loi des métaux intermédiaires, 911; actions chimiques produites par les —, 916; piles à — constants, 926; action des — sur les aimants, 950; champ magnétique dû à un —, 950; gauche d'un —, 950; action des aimants sur les —, 951; — mobile, 951; face positive d'un —, 953; loi des actions réciproques entre les aimants et les —, 953; unité électromagnétique d'intensité de —, 953; action des — sur les —, 954; — parallèles, 954; — angulaires, 955; — sinués, 955; action d'un — sur un solénoïde, 957; aimantation par les —, 958; définition des — d'induction, 663; — induit inverse, 964; — induit direct, 964; induction par les —, 964; induction d'un — sur son propre circuit, 957; — induits de différents ordres, 968; loi de Lenz pour les — induits, 968; force électromotrice, intensité et intensité moyenne des — induits 969; lois générales des — induits, 969; — alternatifs, 971; — redressés, 971 — sinusoïdal, 971; — de Foucault, 974; machine à — sinusoïdaux de d'Arsonval, 979; graduation de l'intensité des — induits dans les appareils médicaux, 939; disposition pour recueillir soit le — induit soit l'extra-courant de l'inducteur, 989; disposition pour recueillir simultanément le — induit et le — de l'inducteur 990; — alternatifs de grande fréquence et de haute tension, 1016.
- COURBES de Lissajoux, 489.
- COURBURE, centre de —, voy. *Centre de courbure*; détermination expérimentale du rayon de — des miroirs sphériques, 565.
- COURONNES irisées produites par des corpuscules, 783; — 1072.
- COUVRE-OBJET 664.
- CRISTAL, dilatation des —. 309; axe cristallographique d'un —, 789; axe optique d'un —, 789; section principale d'un —, 790; — positif et — négatif, 790.
- CRISTALLIN, 648.
- CRISTALLINE (Relation entre le pouvoir rotatoire et la forme), 805.
- CRISTALLISATION, 202.
- CRISTALLOGRAPHIQUE, axe — d'un cristal, 789.
- CRISTALLOÏDES, 209.
- CRITIQUES (Point et température) 356.
- CRYSCOPIE, 203.
- CUMULUS, 1068.
- CYCLE, 436; — de Carnot, 437.
- CYCLONES, 1062; demi-cercle dangereux des —, 1064; demi-cercle maniable des —, 1064.
- CYLINDRE de Faraday, 836.
- CYLINDRIQUES (Lentilles), voy. *Lentilles cylindriques*.

D

- DAGUERRÉOTYPIC, 755.
- DALTON (Loi de), 278.
- DÉBIT d'une machine électrostatique, 880.
- DÉCHARGE d'un condensateur, 867; — brusque, 867; — lente, 867; effets des — électriques, 882; — disruptive, 882; — conductive, 882; effet lumineux de la — électrique, 883; effets calorifiques de la —, 884; effets mécaniques de la —, 884; effets chimiques de la —, 885; — d'un accumulateur, 933; — oscillatoires, 1012.
- DÉCLINAISON MAGNETIQUE, 941, 1082; mesure de la —, 1082; boussole de —, 1083; variation de la —, 1085; variations périodiques de la —, 1086; variations séculaires de la —, 1086; variations diurnes de la —, 1086; variations accidentelles de la —, 1086.
- DÉCOMPOSITION de la lumière, 679.
- DÉFINISSANT, pouvoir — d'un microscope, 667.
- DÉFORMATIONS passagères ou élasti-

- ques des solides, 96; — permanentes dans les solides, 110.
- DEGRÉ centigrade, 295; — Réaumur, 297; — Fahrenheit, 297.
- DEMI-CERCLE dangereux d'un cyclone, 1064; — maniable d'un cyclone, 1064.
- DEMI-LENTILLES de Billet, 769.
- DEMI-ONDE (Lame), 825.
- DENSIMÈTRE, 47; — de Rousseau, 151.
- DENSITÉ absolue, 75; — relative, 75; — détermination expérimentale de la — des solides et des liquides, 136; méthode de la balance hydrostatique, 137; méthode de la balance de Mohr, 140; méthode du flacon, 141; — des solides solubles dans l'eau, 143; méthode des aéromètres, 143; méthode des vases communicants, 152; influence de la température sur la — d'un corps, 299; maximum de — de l'eau, 316, des solutions salines, 318; détermination de la — des gaz, 341, 345; résultats relatifs à la — des gaz, 346.
- DENSITÉ ÉLECTRIQUE, 833.
- DÉPLACEMENT du zéro d'un thermomètre, 337.
- DÉPRESSION, 1062.
- DÉPOLARISATION des piles, 925.
- DÉRIVATION, dynamo en —, 975, montage des lampes à arc et à incandescence en —, 996.
- DÉRIVÉS (Courants), 901, 902.
- DÉSINFECTIION par l'électrolyse, 919.
- DÉTENTE dans l'appareil Cailletet, 382; froid produit par la — d'un gaz, 382; — dans les machines à vapeur, 430.
- DÉVELOPPEMENT des images photographiques, 756.
- DÉVIATION, mesure d'une — angulaire à l'aide des miroirs tournants, 544; angle de — d'un prisme, 585; minimum de — d'un prisme, 586; — des rayons cathodiques par un champ magnétique, 1002.
- DEXTROGYRES (Corps), 801.
- DIABÉTOMÈTRE d'Yvon et de J. Duboseq, 824.
- DIALYSE, 211, 212.
- DIALYSEUR, 212.
- DIAMAGNÉTIQUES (Corps), 945.
- DIAMÈTRE, mesure du — réel des objets microscopiques, 670.
- DIAMÈTRE APPARENT, 650.
- DIAPASONS, 506; emploi des — pour la mesure du temps, 508; — chronographe, 508.
- DIAPHRAGME, emploi d'un — pour la radiographie, 1005.
- DIASPORAMÈTRES, 688.
- DIATHERMANES (corps), 743.
- DIATOMÉES, 668.
- DIÉLECTRIQUE, 833; constante —, 859.
- DIÈZE, 480.
- DIFFÉRENCE DE POTENTIEL, les phénomènes électriques ne dépendent que des — 848; unité électromagnétique C.G.S. de —, 1021; unité pratique de — 1022; mesure des —, 1043, voy. *Mesure*.
- DIFFRACTION, 778; cause de la —, 778; — par le bord d'un écran, 780; franges de —, 780.
- DIFFUSIBILITÉ, coefficient de —, 208; coefficient de — des gaz, 285.
- DIFFUSIF (Pouvoir), voy. *Pouvoir*.
- DIFFUSIOMÈTRE de Bunsen, 286.
- DIFFUSION simple, 208; vitesse de —, 208; — à travers un septum, 209; — des gaz, 284; — de la lumière, 536; intensité et composition de la lumière diffusée, 714; — des radiations calorifiques, 729; intensité et composition de la chaleur diffusée, 739; intensité et nature des radiations chimiques diffusées, 747.
- DILATANTE (Onde), 446.
- DILATATION des corps par la chaleur, 292; généralités sur les —, 298; — cubique, 298; binôme de —, 298; superficielle et linéaire, 299; — absolue et — apparente, 300; détermination expérimentale des coefficients de —, 302; mesure du coefficient de — absolue du mercure, 303; appareil de Dulong et Petit, 304; — des solides, 306; mesure du coefficient de — linéaire, 306.

- méthode de Lavoisier et Laplace, 306; méthode du comparateur, 307; — des corps amorphes et des cristaux, 308; résultats relatifs à la — des solides, 308; application des — des solides, 310; mesure directe du coefficient de — cubique des solides, 311; — des liquides, 314; mesure du coefficient de — absolue des liquides, 314; méthode du thermomètre à poids, 314; méthode des thermomètres comparés, 314; résultats relatifs à la — des liquides, 315, des gaz, 318; coefficient de — des gaz sous pression constante et sous volume constant, 318; — mesure du coefficient de — des gaz sous pression constante, 320, expérience de Gay-Lussac, 320, expérience de Regnault, 323; mesure du coefficient de — des gaz sous volume constant, 325; résultats relatifs à la — des gaz, 327; — des tranches gazeuses pendant la propagation d'un mouvement vibratoire dans un tuyau, 446.
- DIMENSIONS**, lois des — homologues dans les tuyaux semblables, 501; — d'une image donnée par un miroir sphérique, 560, par un dioptré simple, 599, par un système sphérique centré, 621, par une lentille sphérique, 629, par les instruments d'optique, voy. *Grossissement*; — des unités, 1023.
- DIOPTRÉ** plan, 579; — sphérique, 589, voy. *Système sphérique centré et Dioptré simple*.
- DIOPTRÉ** composé, 607, voy. *Système sphérique centré*.
- DIOPTRÉ** simple, foyers principaux d'un —, 592; diverses espèces de —, 593; formule des —, 595; construction géométrique du rayon réfracté correspondant à un rayon incident quelconque dans un —, 596; plans focaux des —, 596; construction géométrique de l'image d'un point situé en dehors de l'axe principal d'un —, 597; image d'un objet dans un —, 599; rapport de grandeur de l'image et de l'objet dans un —, 599; point et plan principal d'un —, 600; points et plans antiprincipaux d'un —, 600; discussion des formules dans un —, 601; aberrations de sphéricité d'un —, 603; aberration longitudinale et transversale d'un —, 603; caustique d'un —, 603; aplanaétisme d'un —, 603; réfraction astigmatique régulière dans un —, 604.
- DIOPTRIE**, 636; mesure des distances en —, 639, formules des lentilles en —, 640; discussion algébrique de la formule des lentilles en —, 642;
- DIOPTRIQUE** (Pouvoir), voy. *Pouvoir*.
- DIRECTION** des vibrations lumineuses, 783.
- DISCUSSION** des formules des miroirs sphériques, 561; — des formules des dioptrés simples, 601; — des formules des lentilles, 631; — des formules des lentilles en dioptries, 642.
- DISPERSION** de la lumière —, 679; — anormale, 680; coefficient de —, 685; coefficient de — partielle, 686; — dans les lentilles, 689; — des radiations calorifiques, 729.
- DISQUE** de Newton pour la synthèse de la lumière blanche.
- DISSOLUTION** des solides, 200; application de la —, 203; — des liquides, 204; — des gaz, 279; extraction des gaz dissous, 282.
- DISSOLVANT**, 200.
- DISSONANCE**, 477.
- DISRUPTIVE** (Décharge), 882.
- DISTANCES** focales des miroirs, 554; — des dioptrés simples, 592; — des systèmes centrés, 621; — des lentilles sphériques, 625; détermination de la — des lentilles sphériques, 632.
- DISTILLATION**, 361; — fractionnée, 371;
- DISTORSION** d'un objectif, 755.
- DIVERGENT**, dioptré —, voy. *Dioptré*; système —, voy. *Système sphérique centré*; lentille —, voy. *Lentille*.

DORURE, 919.
 DOUBLE RÉFRACTION de la lumière, 788, polarisation de la lumière par —, 791; — des ondes électriques, 1016.
 DROITES FOCALES d'un dioptré plan, 579; — dans la réfraction astigmatique régulière, 604; — des lentilles cylindriques, 646.
 DUCTILITÉ, 111.
 DULONG, loi de — et Petit, 421; loi de Neumann et —, 422.
 DURETÉ, 112.
 DYNAMIQUE, 38; objet de la —, 38; principes fondamentaux de la —, 38.
 DYNAMO, 975, voy. *Machines*.
 DYNAMOMÈTRE, 20.

E

EAU, maximum de densité de l' —, 316.
 ÉBULLITION, 365, 367; lois de l' — normale, 367; point normal d' —, 367; influence de la pression sur la température d' —, 367; applications de l' —, 368; — des solutions salines, 370; — des mélanges liquides, 371; mécanisme de la formation des bulles dans l' —, 371.
 ÉCHELLE centigrade, 295; — thermométriques diverses, 296; — Réaumur, 297; — Fahrenheit, 297.
 ÉCHO, 459.
 ÉCLAIR, 1076; diverses espèces d' —, 1076; — de chaleur, 1076.
 ÉCLAIRAGE, intensité d' —, 698, voy. *Intensité*; — électrique, 993.
 ÉCLAIRANT, système — des appareils de projection, 663; pouvoir —, voy. *Pouvoir*.
 ÉCLAIREMENT, 697; mesure de l' — sur une surface quelconque, 704.
 ÉCLIPSES de lune, 534; — de soleil, 534.
 ÉCOULEMENT DES GAZ à travers un orifice, 237, dépense, contraction de la veine, 239; — dans un tuyau, mesure de la dépense et de la vitesse d'écoulement, 239; — dans les tubes capillaires 241.
 ÉCOULEMENT DES LIQUIDES, 154; vitesse d' —, 156, — par un orifice en mince paroi, 156, dépense, 157; — dans un tuyau rectiligne et de diamètre uniforme, 159; — dans un tuyau rectiligne et de diamètre variable, 163; — dans les tuyaux ramifiés, 166; — dans les tuyaux coudés de diamètre uniforme, 164; influence de l'élasticité et de l'extensibilité des parois d'un tuyau sur l' —, 167; — dans les tubes capillaires, 169; — par gouttes, 192.
 ÉCRAN (Diffraction par le bord d'un), 780.
 ÉCRANS ÉLECTRIQUES, 832.
 ÉCROUISSAGE, 117.
 EFFETS des radiations, 749; — calorifiques des radiations, 750.
 EFFET PELTIER, 909.
 EFFET THOMPSON, 909.
 EFFUSION des gaz, 237.
 ÉLASTICITÉ, 94; limite d' — 95, 110; diverses espèces d' —, 96; coefficient d' —, 99; rôle de l' — d'une membrane courbe dans la transmission de pressions, 104; — dans les corps isotropes et anisotropes, 107; applications de l' —, 108; influence de l' — des parois du tuyau sur l'écoulement d'un liquide, 167.
 ÉLECTRICITÉ, phénomènes généraux de l' —, 827; corps bons et mauvais conducteurs de l' —, 827; deux espèces d' —, 828; unité de quantité d' —, 831; distribution de l' — dans les bons et les mauvais conducteurs, 831; conservation de l' —, 841; actions des radiations sur l' —, 1010; action de l' — sur la propagation des radiations, 1011.
 ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE, 1072; origine de l' —, 1074.
 ÉLECTRIQUE, pendule —, 828; lois des attractions et des répulsions —, 829; charge —, 831; densité —, 833; force —, 834; potentiel —, voy. *Potentiel*; champ —, voy. *Champ*; etc.

- ÉLECTRISATION par contact et par frottement, 835; — par influence, 835; — des nuages, 1075.
- ÉLECTRO-AIMANTS, 960.
- ÉLECTRO-CAPILLAIRES (Phénomènes), 934.
- ÉLECTRODES des piles, 888; — pour l'électrolyse, 916; polarisation des —, 922.
- ÉLECTRODYNAMIQUE, 938.
- ÉLECTRODYNAMOMÈTRES, principe des —, — 1035; — balances, 1035.
- ÉLECTROLYSE, 916; exemples d' —, 917; applications de l' —, 918; blanchiment par l' —, 919; désinfection par l' —, 919; lois quantitatives de l' — ou lois de Faraday, 921.
- ÉLECTROLYTE dans les piles, 888; — dans l'électrolyse, 916.
- ÉLECTRO-MAGNÉTISME, 938.
- ÉLECTROMÈTRE, comparaison du potentiel avec les indications de l' —, 849; — à quadrants, 855; — de Henley, 871, — capillaire de Lippmann, 935; mesure des différences de potentiel par les —, 1044; mesure de la force électromotrice d'une pile par les —, 1045.
- ÉLECTROMOTEUR, 869; puissance d'un —, 896; groupement des —, 897; voy. *Groupement*.
- ÉLECTROMOTRICE (Force), voy. *Force électromotrice*.
- ÉLECTROSCOPE à feuilles d'or, 836, 840; — condensateur, 861.
- ÉLECTROPHORE, 871.
- ÉLECTROSTATIQUE, pression —, 834; capacité —, voyez *Capacité*; machines —, voy. *Machines*.
- ÉLÉMENT, voy. *Pile*; — bismuth-antimoine, 726, 912, 914; — Noé, 912; — Clamond, 912; — platine-palladium, 913; — platine-platine-rhodié, 914; — cuivre-maillecoirt, 914; — du genre Volta, 924; — Daniell, 926; — de Grove 928; — de Bunsen, 928; — de Poggen-dorff ou au bichromate de potassium, 928; — Grenet ou pile à bouteille, 929; — Leclanché, 929; — au chlorure d'argent, 929.
- EMBOUCHURE, tuyaux à —, de flûte, 493.
- ÉMISSIF (Pouvoir), voy. *Pouvoir*.
- ÉMISSION des radiations, 695; spectres d' —, voy. *Spectres*.
- ÉNANTHIOMORPHIE, 805.
- ENDOSMOMÈTRE, 209.
- ENDOSMOTIQUE (Équivalent), 211.
- ÉNERGIE, 45; principe de la conservation de l' — 45; — actuelle ou cynétique, 45; — potentielle, 45; — électrique, 862; unité d' — électrique, 863; transport électrique de l' —, 984.
- ENREGISTREMENT, appareils à — photographique, 759.
- ENREGISTREURS, baromètres —, 232, voy. *Baromètres*; thermomètres —, 340.
- ENVELOPPES, composante normale des — flexibles, courbes et tendues, 103.
- ÉPAISSEUR, influence de l' — sur le pouvoir émissif calorifique, 731.
- ÉPREUVE négative, 757; — positive, 758; plan d' —, 832.
- ÉQUATEUR magnétique, 1086.
- ÉQUATORIAUX, région des calmes —, 1060.
- ÉQUIFOCAUX (Systèmes), 621.
- ÉQUILIBRE, 19; condition d' — des forces concourantes, 24, des forces parallèles, 25, des forces quelconques, 27; — du levier, 28; — de la poulie et de la moufle, 30; — sur un plan incliné, 32; — du coin, 33; généralité sur l' — des solides, 87; — d'un solide soumis à la pesanteur, 87; — d'un solide plongé dans un liquide, 134; — d'un liquide soustrait à l'action de la pesanteur, 180; — des gaz, 214; — d'un corps plongé dans un gaz, 234; — mobile des températures, 737.
- ÉQUIPOTENTIELLES (Surfaces), 846.
- ÉQUIVALENCE, principe de l' —, 433; nécessité de l'intensité de l'état final pour l' —, 435.
- ÉQUIVALENT endosmotique, 211; — mécanique de la chaleur, 434.
- ESPACE NUISIBLE dans la machine pneumatique, 260.

ESSEUSE, 93.
 ÉTALEMENT des liquides, 183.
 ÉTALON Violle d'intensité lumineuse, 699; — de résistance, 1037; pile —, 1045.
 ÉTAT, divers — de la matière, 5; nécessité de l'identité de l' — initial, et de l' — final pour l'équivalence, 435; influence de l' — physique sur le pouvoir émissif calorifique, 731; — radiant, 998.
 ÉTAT HYGROMÉTRIQUE, 383.
 ÉTINCELLE électrique, 883; — de rupture, 994.
 ÉTOFFES, influence de la couleur des — sur leur température, 756.
 ÉTOILES (Spectre des), 725.
 ÉVAPORATION, 365; vitesse d' —, 365.
 EXCITATEUR, 867; — pour les ondes électriques, 1013.
 EXCITATRICES (Radiations), 754.
 EXPANSIBILITÉ des gaz, 213.
 EXPÉRIENCES de Galvani et de Volta, 885; — de Hertz, 1013; — de d'Arsonval et de Tesla sur les courants de haute fréquence, 1016.
 EXPÉRIMENTATION, 2.
 EXTENSIBILITÉ, 95; influence de l' — des parois d'un tuyau sur l'écoulement d'un liquide, 167.
 EXTRA-COURANT de fermeture, 967; — de rupture, 967; disposition pour recueillir l' — de rupture, 967; disposition pour recueillir soit le courant induit, soit l' — de l'inducteur, 989; disposition pour recueillir simultanément le courant induit et l' — de l'inducteur, 990.
 EXTRACTION des gaz dissous, 282.
 EXTRAORDINAIRE (Rayon), 790.

F

FACE positive et — négative d'un courant, 953.
 FANTÔME magnétique, 940.
 FARAD, 856, 1022.
 FARADAY, loi de — sur l'électrolyse, 921.
 FERMETURE (Extra-courant de), 967.
 FILÈRE, 111.

FILTRATION, 207.
 FIXAGE de l'épreuve négative, 757; — de l'épreuve positive, 759.
 FLAMMES MANOMÉTRIQUES (Analyse des sous complexes par les), 513.
 FLÈCHE de flexion, 105.
 FLEXION, 105; flèche de —, 105.
 FLUORESCENCE, 765; — provoquée par les rayons cathodiques, 1000.
 FRÉQUENCE (Courants de haute), 1016.
 FLÛTE (Tuyaux à embouchure de), 493.
 FOCALES droites —, voy. *Droites focales*; distances — voy. *Distances focales*.
 FOI (Ligne de), 1084.
 FORCE, 4; éléments d'une —, 19; mesure des —, 20; composition et décomposition des — concourantes, 20; — parallèles, 21; règle du parallélogramme des —, 21; règle du parallépipède des —, 21; centre des — parallèles, 23; condition d'équilibre des — concourantes, 24, parallèles, 25, quelconques, 27; action rectiligne des —, 39; indépendances des effets des — simultanées, 40; unité de —, 42; dimension de l'unité de —, 1024.
 FORCE ASCENSIONNELLE, 235.
 FORCE CENTRIFUGE, 92.
 FORCE CENTRIPÈTE, 92.
 FORCE COERCITIVE, 914.
 FORCE CONDENSANTE, 858.
 FORCE ÉLASTIQUE des gaz, 213, 242; accroissement des — intérieures sous l'influence de la chaleur, 294; — maxima des vapeurs, 354; — des vapeurs mélangées aux gaz, 358; — d'un mélange de vapeurs, 359; — d'une vapeur saturante dans une enceinte dont la température n'est pas homogène, 360.
 FORCE ÉLECTRIQUE, 834.
 FORCE ÉLECTROMOTRICE de contact, 887; — d'un élément de pile, 889; — de plusieurs éléments associés en série ou en tension, 889; — de polarisation, 922; — des courants induits, 969; unité électromagnétique C.G.S. de —, 1021; unité

- pratique de —, 1022; mesure de la —, 1045, voy. *Mesure*.
- FORCE VIVE, 43; théorème des —, 44.
- FORMULE des miroirs sphériques, 554; discussion des — des miroirs sphériques, 561; — des dioptrés plans, 580; — des lames à faces parallèles, 583; — des dioptrés simples, 595, discussion de cette —, 601; — des systèmes sphériques centrés, 620; — des lentilles minces, 624; — des lentilles sphériques, 627, discussion de cette —, 631; — des lentilles en dioptries, 640, — discussion de cette —, 642.
- FOUDRE, 1076; effets de la —, 1077.
- FOURIER (Théorème de), 18, 524.
- FOYERS CONJUGUÉS des miroirs sphériques, 551; — des dioptrés simples, 592; — d'un système sphérique centré, 607, 616; — des lentilles, 624.
- FOYER PRINCIPAL des miroirs sphériques, 553; — des dioptrés simples, 592; — d'un système sphérique centré, 608, 609, 616; — des lentilles, 625.
- FRANGES d'interférence, 771; influence de la longueur d'onde des radiations sur la largeur des — d'interférence, 772; — de diffraction, 780; — de polarisation chromatique, 797.
- FRAPPE des monnaies, 112.
- FRAUNHOFER (Raies de), 684.
- FREINS Westinghouse, 273.
- FROID produit par la vaporisation, 375; — produit par la détente, 382; sources de —, 438.
- FROTTEMENT intérieur des liquides, 170; — intérieur des gaz, 242; électrisation par —, 835; machines électrostatiques à —, 869, 870.
- FUSION, 347; généralités sur la —, 347; lois de la —, 347; point de —, 348; changements de volume qui accompagnent la —, 349; influence de la pression sur le point de —, 351; chaleur de —, 424, 433.
- G**
- g* (accélération de la pesanteur), détermination expérimentale de —, à l'aide du plan incliné, 64, de la machine d'Atwood, 65, de la machine de Morin, 65, du pendule, 65, 69; valeur de —, 71; variation de — avec la latitude et l'altitude, 71.
- GALVANI (Expériences de), 885.
- GALVANO-CAUTÈRE, 900, 908.
- GALVANOMÈTRE, principes du —, 1026; description des —, 1029; sensibilité des —, 1029; amortissement des —, 1030; — apériodiques, 1030; shunt pour les —, 1031; — divers, 1032; — ordinaire, 1032; — de Thomson, 1032; — de Wiedemann, 1033; — de Desprez-d'Arsonval, 1034; — balistique, 1036; résistance d'un —, 1042; mesure des différences de potentiel par les — étalonnés, 1044; mesure de la force électromotrice d'une pile par les — étalonnés, 1045.
- GALVANOMÉTRIQUE (Constante), 1027.
- GALVANOPLASTIE, 919.
- GAMME, 478; — tempérée, 481; — mélodique, 481; — harmonique, 481.
- GAUCHE d'un courant, 950.
- GAZ, propriétés générales des —, 213; action de la pesanteur sur les —, 213; force élastique des —, 213, 242; expansibilité des —, 213; compressibilité des —, 213, 242; équilibre des —, 214; surfaces de niveau dans les —, 215, 216; application du principe d'Archimède aux —, 215, 217, 234; équilibre d'un corps plongé dans un —, 234; écoulement des —, 237; effusion des —, 237; écoulement des — dans les tubes capillaires, 241; transpiration des —, 242; actions moléculaires dans les —, 242; actions moléculaires réciproques des —, entre — et liquides, entre — et solides, 278; mélange des —, 278; absorption des — par les

- liquides, 279; dissolution des —, 279; coefficient de solubilité des —, 280; extraction des — dissous, 282; absorption des — par les solides, 283; occlusion des —, 283; diffusion des —, 284; coefficient de diffusibilité des —, 285; osmose des —, 285; pénétration des —, 289; osmose entre — et liquides à travers un septum, 290; dilatation des —, 318; relation entre le volume, la température et la force élastique d'un —, 329; équation fondamentale des — parfaits, 330; détermination du poids spécifique ou de la densité des —, 341, 345; poids d'un volume déterminé de —, 342; résultats relatifs à la densité des —, 346; force élastique des vapeurs mélangées aux —, 358; conductibilité des —, 403; convection dans les —, 405, 406; chaleur spécifique des —, 419, 420; vitesse du son dans les —, 457; mesure indirecte de la vitesse du son dans les —, 500; spectre des — incandescents, 710; manière de rendre les — incandescents, 712; spectre d'absorption des —, 720; transmission de la chaleur à travers les —, 744; décharge électrique dans les — raréfiés, 927, voy. *Tubes* de Geissler et de Crookes; résistance électrique des —, 1041.
- GAZEUX, état —, 6; corps —, 213, voy. *Gaz*.
- GAY-LUSSAC (Lois de), 222.
- GELÉE, action de la — sur les végétaux, 350.
- GELÉE BLANCHE, 1066.
- GÉLIVRES (Pierres), 250.
- GENÉRATRICE (Machine Gramme), 985.
- GIVRE, 1066.
- GLACE, regel de la —, 351; moulage de la —, 352.
- GLACIERS (Déplacement des), 352.
- GOUTTES (Écoulement d'un liquide par), 192.
- GRADUATION du thermomètre à mercure, 336, à alcool, 337.
- GRAMMOPHONE, 528.
- GRAPHIQUE, méthode —, 16; méthode — pour la mesure de la hauteur d'un son, 486; analyse des sons par la méthode —, 515.
- GRAPHOPHONE, 528.
- GRÊLE, 1069.
- GROSSISSEMENT des instruments d'optique, 650; — des appareils de projection, 651, 652; — de la loupe, 651, 654, discussion géométrique de ce —, 655; — du microscope composé, 651, 658, discussion géométrique de ce —, 658; mesure du — du microscope composé, 668; — dans les lunettes et les télescopes, 651, 672.
- GROTHUS (Théorie de), 916.
- GROUPEMENT des condensateurs, 863; — des électromoteurs, 897; — des électromoteurs en tension, 897, en batterie ou en surface, 898; avantages des divers modes de —, 899; — des électromoteurs en opposition, 915; — en série ou en dérivation des lampes à arc ou des lampes à incandescence, 996.
- GULF-STREAM, 1057.

H

- HALOS, 1071.
- HARMONIE, 476.
- HARMONIQUE, gamme —, 481; intervalles —, 483; sons —, 483.
- HAUTEUR (*d'un son*), 475; mesure de la —, 483; procédés basés sur l'emploi de l'oreille pour la mesure de la —, sirène, 483; méthode graphique pour la mesure de la —, 486; méthode optique pour la mesure de la —, 488; méthode stroboscopique pour la mesure de la —, 492.
- HÉLIOSTAT, 547.
- HÉMIÉDRIE non superposable, 805.
- HENRY (Loi de), 280.
- HERTZ (Expériences de), 1013.
- HOMOCENTRIQUE (Faisceau), 532.
- HOMOLOGUES, lois des dimensions — dans les tuyaux semblables, 501.

- HOMOPHONE (Musique), 477.
 HUYGHENS (Principe de), 778.
 HUMIDITÉ atmosphérique, 1065.
 HYDRODYNAMIQUE, 153.
 HYDRO-ÉLECTRIQUES, couples, éléments et piles, voy. *Éléments* et *Piles*.
 HYDROGÈNE (Liquéfaction de l'), 383.
 HYDROSTATIQUE, 120; pression —, 120.
 HYGROMÈTRE, 368, 384; — chimique, 384, 385; — à condensation, 384, 387; — à absorption, 384, 391; — de Leroy, 387; — de Daniell, 388; — de Regnault, 388; — d'Al-lu-ard, 389; — de Crova, 390; — de de Saussure, 391.
 HYGROMÉTRIE, 383.
 HYGROMÉTRIQUE (*État*), 383; — de l'atmosphère, 1065.

I

- IMAGE, formation des — dans la chambre noire, 534; — réelle et virtuelle, 540; — d'un point dans un miroir plan, 539; — d'un objet dans un miroir plan, 540; — multiples données par les miroirs en verre, 546; — d'un point situé sur l'axe principal d'un miroir sphérique concave, 549, convexe, 551; — d'un point situé sur un axe secondaire d'un miroir sphérique, 555; construction géométrique de l' — d'un point situé en dehors de l'axe principal d'un miroir sphérique, 558; — d'un petit plan et d'une petite droite perpendiculaires à l'axe principal d'un miroir sphérique, 559; construction géométrique de l' — d'une petite droite perpendiculaire à l'axe principal d'un miroir sphérique, 559; relation de grandeur entre un objet et son — dans un miroir sphérique, 560; — d'un point dans un dioptré plan, 579; — d'un point vu à travers une lame à faces parallèles, 583; — d'un point vu à travers un prisme, 587; — d'un point lumineux dans un dioptré simple, 590; — d'un point situé en dehors de l'axe principal d'un dioptré simple, construction géométrique, 597, — d'un objet dans un dioptré simple, 599; rapport des grandeurs de l' — et de l'objet dans un dioptré simple, 599; — d'un objet dans un système sphérique centré, construction géométrique, 614; rapport de grandeur de l' — et de l'objet dans un système sphérique centré, 621; — d'un point situé hors de l'axe principal dans une lentille sphérique, 628; — d'un objet dans une lentille sphérique, 629; relations de dimensions de l' — et de l'objet dans une lentille sphérique, 629.
 IMBIBITION, 205.
 IMMERSION (Objectifs à), 664.
 IMPRESSIONNABLES (Substances), 753.
 INCANDESCENCE (Lampes à), 993, voy. *Lampes*.
 INCLINAISON, influence de l' — sur le pouvoir émissif calorifique, 732; — magnétique, 941, 1082; mesure de l' —, 1082; boussole d' —, 1084; variations de l' —, 1085; variations périodiques, séculaires, diurnes et accidentelles, de l' —, 1086.
 INCLINANTS (Microscopes), 665.
 INDÉPENDANCE des effets des forces simultanées, 40.
 INDICES de réfraction relatifs et absolus, 574.
 INDUCTEUR, pouvoir — spécifique, 859; —, 964.
 INDUCTION, définition des courants d' —, 963; de l' —, 963; — par les courants et les aimants, 964; — par la terre, 966; — d'un courant sur son propre circuit, 967; — dans la masse d'un conducteur non linéaire, 974; machine d' —, 974; voy. *Machine*, bobine d' —, 985, voy. *Bobine d'induction*.
 INDUCTRICES (Radiations), 763.
 INDUIT, 964; courants —, voy. *Courant*.

- INDUITES (Radiations), 763.
- INFLUENCE, analyse des sons par —, 516; électrisation par —, 836; machines électrostatiques à —, 869, 871; aimantation par —, 913.
- INÉQUIFOCAUX (Systèmes), 621.
- INERTIE de la matière, 4; principe de l'—, 5; moment d'—, 70.
- INSTANTANÉE (Photographie), 760.
- INSTRUMENTS D'OPTIQUE, des — engénéral, 647; grossissement des —, 650.
- INTENSITÉ du son, 452; variation de l'— du son avec la distance du corps sonore, 452; — d'un son, 475; — des radiations lumineuses émises par les différentes sources, 697; — d'éclairage, 698; loi de la variation de l'— d'éclairage avec la distance de la surface à la source et l'orientation de cette surface, 698; mesure de l'— d'éclairage, 699; — relative d'une source lumineuse, 699; — de la lumière réfléchie 713, diffusée 714, absorbée, 715, transmise, 745; — des radiations calorifiques émises par les différentes sources 729; — de la chaleur réfléchie 738, diffusée 739, absorbée, 740, transmise, 742; — des radiations chimiques émises par les différentes sources, 746; — des radiations chimiques réfléchies, 747, diffusées, 747, absorbées, 748, transmises, 748; — d'un champ électrique, 842; — d'un courant électrique, 891; unité d'— de courant, 892; — d'un champ magnétique, 946; unité électromagnétique C. G. S. d'— de courant, 954, 1021; — et — moyenne des courants induits, 969; unité pratique d'— de courant, 1022; mesure des — de courant, 1025, voy. *Mesure*; — calorifique de la radiation solaire, 1049.
- INTERFÉRENCE, 460; — de deux mouvements vibratoires de même période, 461; — de deux sons de même période, réalisation expérimentale, 464; — d'ondes directes et réfléchies, 468; — de deux mouvements vibratoires de périodes inégales, 471; — de la lumière, 767; — de deux mouvements vibratoires lumineux de même période, 768; franges d'—, 771, voy. *Franges*; spectres d'—, 773; — des ondes électriques, 1015, 1016.
- INTERRUPTEUR ou trembleur électrique, 961; — à mercure de Foucault, 987; — des bobines d'induction médicales, 989; de l'— dans la technique de la radiographie, 1007.
- INTERVALLES musicaux, 476; — harmoniques, 483.
- INVERSION des spectres de lignes, 722; — des courants thermo-électriques, 911.
- ISOBARES (Lignes), 1062.
- ISOCHIMÈNES (Lignes), 1054.
- ISOCRONISME des petites oscillations pendulaires, 68.
- ISOCLINES (Lignes), 1085.
- ISOGONES (Lignes), 1085.
- ISOLANTS (Corps), 882.
- ISOMÈRES, nombre d'— dans le cas où la molécule contient plusieurs carbones asymétriques, 808, dans le cas de plusieurs carbones asymétriques réunis par une liaison simple, 810, dans le cas où la formule est symétrique, 811.
- ISOMÉRIE, 806, voy. *Isomérisation*.
- ISOTHÈRES (Lignes), 1054.
- ISOTHERMES (Lignes), 1054.
- ISOTROPES (Corps), élasticité dans les —, 107; conductibilité calorifique des —, 403; réfraction dans les —, 572, voy. *Réfraction*.

J

JARRES électriques, 864.

JAUGE de MacLeod, 270.

JOULE, 863. Loi de —, 905.

JUMELLE de spectacle, 676.

JURIN (Loi de), 188.

K

KATHODE, 916.

KERR (Phénomène de), 1011.
 KIRCHHOFF (Lois de), 902.

L

- LA normal, 479.
 LACTO-DENSIMÈTRE, 148.
 LAMES, réfraction à travers les —, à faces parallèles, 581; coloration des — minces, 774; — parallèles à l'axe optique, 795; — perpendiculaires à l'axe optique, 800; — demi-onde, 825.
 LAMINAGE, 112.
 LAMINAIRES (Systèmes), 182.
 LAMPE Davy, 405; — Combes, 405; — Carcel, 699; — à incandescence, 993; — à arc, 994; montage en série et en dérivation des — à arc et des — à incandescence, 996; — de Tesla, 1018.
 LAPLACE (Loi de), 188.
 LATITUDE, corrections barométriques relatives à la —, 229; influence de la — sur la température de l'air, 1052.
 LENTILLES sphériques, 622; — cylindriques, 644; — plan-cylindriques, 644; — sphéro-cylindriques, 645; — hyperboliques, 647.
 LENTILLES CYLINDRIQUES, 644; méridiens principaux des —, 646; Droites focales des —, 646; numérotage des —, 646.
 LENTILLES SPHÉRIQUES, centre optiques des —, 622; points nodaux et principaux des —, 624; — minces, 624; formules des — minces, 624; distances focales, plans focaux des — minces, 625; diverses espèces de —, 626; formule des — 627; construction géométrique du rayon réfracté correspondant à un rayon incident quelconque dans les —, 627; image d'un point situé hors de l'axe principal d'une —, 628; image d'un objet dans une —, 629; relations de dimensions de l'image et de l'objet dans une —, 629; discussion des formules des —, 631; détermination de la distance focale des — 632; numérotage des —, 634; passage d'un système de numérotage à l'autre, 637; signification du numéro ou pouvoir dioptrique d'une —, 638; formule des — en dioptries, 640, discussion algébrique de cette formule, 642; pouvoir dioptrique de plusieurs — associées, 642; aberration de sphéricité des —, 643; — de champ du microscope, 660; dispersion ou aberration de réfrangibilité dans les —, 689 achromatisme des —, 690.
 LENZ (Loi de), 968.
 LEVIER, équilibre du —, 28; divers genres de —, 29; travail du — 48.
 LÉVOGYRES (Corps), 801.
 LIGNES Spectres de —, 710; — de force électrique, 842; — de force magnétique, 946; — de commutation ou — neutre de la machine Gramme, 981; — isothermes, 1054; — isothères, 1054; — isochimènes, 1054; — isobares, 1062; — de foi, 1084; — isoclines, 1085; — isogones, 1085.
 LIMITE des sons perceptibles, 476; angle —, 573.
 LIQUÉFACTION, généralités sur la —, 352; limite du phénomène de —, 355; de la —, 379; procédés généraux de —, 379; — par refroidissement simple, 379; — par compression, 379; tube de Faraday, 380; appareil de Thilorier, 380; pompe de Cailletet, 380; méthode de Pictet, 380; méthode de Cailletet, 381; expériences récentes, 383.
 LIQUIDE, état —, 6, 120; corps —, 120; transmission des pressions dans les —, 121, 122; égalité des pressions dans tous les sens autour d'un point dans un —, 122; égale transmission des pressions dans tous les sens dans un —, 123; surfaces de niveau des —, 126; surface libre d'un — en équilibre,

127; surface de séparation de deux — en équilibre, 129; pression d'un — sur le fond horizontal d'un vase, 130; pression d'un — sur une surface plane non horizontale, 132; équilibre d'un solide plongé dans un —, 134; détermination expérimentale de la densité des —, 136; chute des —, 153; écoulement des —, 154; écoulement des — dans les tubes capillaires, 169; actions moléculaires dans les —, 171; compressibilité des —, 171; tension superficielle des —, 175; équilibre d'un — soustrait à l'action de la pesanteur, 180; actions moléculaires réciproques des —, 182; actions moléculaires entre — et solides, 182; étalement des —, 183; tension superficielle au contact d'un — et d'un solide, 183; angle de raccordement d'un — et d'un solide, 184; suspension d'un — dans un tube capillaire, 191; écoulement d'un — par gouttes, 192; mouvement des — dans les tubes coniques, 194; dissolution des —, 204; actions moléculaires entre gaz et —, 278; absorption des gaz par les —, 279; osmose entre gaz et — à travers un septum, 290; dilatation des —, 314; conductibilité des —, 403; convection dans les —, 405, 406; chaleur spécifique des —, 419; vitesse du son dans les —, 457; spectres d'émission des — incandescents, 709; spectres d'absorption des —, 718; résistance électrique des —, 1041.

LISSAJOUX (Courbes de), 489.

Loi physique, 2; — d'un mouvement, 7; — du mouvement du pendule simple, 68; — de l'élasticité de traction dans les corps inorganiques, 97 et organiques, 99; — de Toricelli, 156; — expérimentales des tubes capillaires, 187; — de Jurin, 187; — de Laplace, 188; — de Tate, 193; — de

Mariotte, 242; — de Dalton, 278; — de Henry, 280; — de Gay-Lussac, 322; — de l'ébullition normale, 367; — de Dulong et Petit, 421; — de Neumann et Dulong, 422; — de Wœstyn, 423; — des tuyaux fermés, 495; — des tuyaux ouverts, 496; — des dimensions homologues dans les tuyaux semblables, 501; — des vibrations transversales des cordes, 503; — des vibrations transversales des verges, 506; — élémentaires de la réflexion de la lumière, 537; — élémentaires de la réfraction, 572; — de l'inverse du carré des distances, 698; — du cosinus, 699; — de l'inverse du carré des distances et du cosinus pour les radiations calorifiques, 730; — de Newton, 734; — de Malus, 792; — des attractions et des répulsions électriques, 829; — des contacts successifs, 887; — d'Ohm, 892; — de Kirchhoff, 902; — de Joule, 905; — des métaux intermédiaires, 911; — de Faraday sur l'électrolyse, 921; — des attractions et des répulsions magnétiques, 941; — des actions réciproques entre les aimants et les courants, 953; — de Leuz, 968; — générales des courants induits, 969.

LONGITUDINALES (Vibrations), voy. *Vibrations*.

LONGUEUR (Unité de), 7.

LONGUEUR D'ONDE d'un mouvement vibratoire, 450; graduation du spectroscopie en —, 707; détermination de la — des mouvements vibratoires lumineux, 771; influence de la — des radiations sur la largeur des franges d'interférence, 772; — des oscillations électriques, 1015, 1016.

LONGUETIE de spectacle, 676.

LOUPE, grossissement de la —, 651, 654; discussion géométrique du grossissement de la —, 655; — diaphragmées, 656; — composées, 656.

- LEURS électriques, 883.
- LUMIÈRE, nature de la —, 530, 767; propagation rectiligne de la — dans un milieu homogène, 531; vitesse de propagation de la —, 533; réflexion de la —, voy. *Réflexion*; changement de direction de la — à la surface de séparation de deux milieux, influence de la nature de la surface, 536; diffusion de la —, 536, 714; réfraction de la —, voy. *Réfraction*; dispersion de la —, 679, voy. *Dispersion*; décomposition et analyse de la —, 679; recombinaison ou synthèse de la — blanche, 681, voy. *Synthèse*; interférences de la —, 767, voy. *Interférences*; — naturelle, 783; — polarisée, 784; — polarisée rectilignement, 784; proportion de — polarisée par réflexion et par réfraction simple, 787; double réfraction de la —, 788; polarisation de la — par double réfraction, 791.
- LUMINEUSES (Sources), 529.
- LUNE (Éclipses de), 534.
- LUNETTE, grossissement des —, 651, 672; — astronomique, 674; clarté d'une —, 674; réticule d'une —, 675; axe optique d'une —, 675; anneau oculaire d'une —, 675; — terrestre, 675; — de Galilée, 675.
- M**
- MACHINE. Du travail dans les — simples, 48; — d'Atwood, 58, 65; — de Morin, 60, 65; — pneumatique, 259; espace nuisible de la — pneumatique, 260; — pneumatique à deux corps de pompe, 261, perfectionnement de Babinet, 263; — pneumatique de Bianchi, 264, de Deleuil, 264; — à compression, 270; — à glace de E. Carré, 377, de F. Carré, 377; — à vapeur, 428; historique de la — à vapeur, 428; principe de la — à vapeur, 428; diverses espèces de — à vapeur, 430; rendement d'une — thermique, 436; — électrostatiques à frottement, 869, 870; — électrostatiques à influence, 869, 871; — électrostatiques de Ramsden, 870, de Carré, 872, de Holtz, 873, de Voss, 877, de Wimshurst, 879, de Bonnetti, 880; débit d'une — électrostatique, 880; — d'induction, 974; — magnéto-électriques, 975; — dynamo-électriques, 975; — dynamo en série, 975, en dérivation, 975, compound, 975; principe des — dynamos, 975; — de Clarke, 976; — de Pixii, 976; — de Page, 978; — de Breton, 978; — de d'Arsonval, 979; principe de la — Gramme, 980; ligne de commutation ou ligne neutre de la — Gramme, 981; description de la — Gramme, 983; collecteur, 983; balais, 984; angle de calage des balais, 984; calage variable, dans la — Gramme 984; réversibilité de la —, Gramme, 984.
- MAGNÉTIQUE, fantôme —, 940; axe —, 941; méridien —, 941, 1082; déclinaison —, voy. *Déclinaison magnétique*; corps —, 945; pôles — 1083; équateur —, 1086.
- MAGNÉTISME, 938; — nord et sud, 941; quantité de —, 942; unité de —, 942; — temporaire, 944; — rémanent, 944; égalité des deux — d'un aimant, 948; théorie du — d'Ampère, 958; applications du —, 959; — terrestre, 1081.
- MAGNÉTO-ÉLECTRIQUES (Machines), 975.
- MALLÉABILITÉ, 112.
- MALUS (Loi de), 792.
- MANIPULATEUR des télégraphes, 963.
- MANOMÈTRE, influence des actions capillaires sur la hauteur du —, 199; des —, 251; — à air libre, 251; — barométrique, 252; — différentiel de Krœtz, 253; — à air comprimé, 255; — métallique de Bourdon, 256.
- MANOMÉTRIQUE, capsule —, 465; analyse des sons complexes par les flammes —, 513.
- MARIOTTE (Loi de), 242.

- MARMITE de Papin, 369.
 MARTEAU d'eau, 153.
 MARTELAGE, 112.
 MASSE, 40; unité de —, 42; — électrique, 831; — magnétique, 942.
 MATIÈRE, propriétés générales et essentielles de la —, 3; principe de la conservation de la —, 4; inertie de la —, 4; divers états de la —, 5.
 MAXIMUM de densité de l'eau, 316, sa température, 317; — de densité des solutions salines, 318.
 MÉCANIQUE (Notions de), 7.
 MÉLANGES réfrigérants, 204; — des gaz, 278; méthode calorimétrique des —, 412.
 MÉLODIE, 476.
 MÉLODIQUE (Gamme), 481.
 MEMBRANE, composante normale des — courbes tendues, 103; rôle d'une — courbe dans la transmission des pressions, 104; vibrations transversales des —, 511.
 MER, influence de la proximité de la — sur la température de l'air, 1054; température de la —, 1056; brise de —, 1061.
 MÉRIDIEEN MAGNÉTIQUE, 911, 1082.
 MÉRIDIEENS principaux dans la réfraction astigmatique régulière, 604; — principaux des lentilles cylindriques, 646.
 MESURE du temps, 93, 508; — de la pression atmosphérique, 218, 230; — de l'altitude au moyen du baromètre, 230; correction des — de longueur par suite de la dilatation de l'échelle, 310; — des coefficients de dilatation, voy. *Dilatation*; — des températures, voy. *Thermomètre et Température*; — des tensions maxima de vapeur, 361, voy. *Tension maxima*; — de la vitesse du son, voy. *Son*; — de la hauteur d'un son, voy. *Hauteur d'un son*; — de la vitesse de la lumière, 535; — de l'intensité d'éclairage, 699; — de l'éclairement, 704; — du grossissement des instruments d'optique, voy. *Grossissement*; — de la longueur d'onde, voy. *Longueur d'onde*; — électriques, 1025; — de l'intensité d'un courant par les actions chimiques, 1025; — électromagnétique, 1026, et électrodynamique, 1035, de l'intensité d'un courant; — des quantités d'électricité par la méthode chimique, 1036, par la méthode du galvanomètre balistique, 1036, par les compteurs d'électricité, 1036; — des résistances électriques, par la méthode de substitution, 1039, par la méthode du pont de Wheatstone, 1039; résultats et applications des — de résistance, 1040; — de la résistance d'un galvanomètre, 1042, d'une pile, 1043; — des différences de potentiel par les électromètres, 1044, par les galvanomètres étalonnés, et par les voltmètres, 1044; — de la force électromotrice d'une pile par les électromètres, 1045, par les galvanomètres étalonnés, 1045, par les voltmètres, 1045, par la méthode de Poggendorff, 1045, de Boscha, 1046; — des capacités électrostatiques, 1047; — de la température de l'air, 1048; — du potentiel en un point de l'air, 1072; — de la déclinaison et de l'inclinaison, 1082.
 MÉTACENTRE, 135.
 MÉTHODE graphique, voy. *Graphique*; — optique, 488; — stroboscopique, voy. *Stroboscopique*; — de Poggendorff pour la mesure des angles, 544.
 MÉTÉOROLOGIE, 1048.*
 MICROBES, action des radiations sur les —, 760.
 MICROFARAD, 856.
 MICROMÈTRE objectif, 668; — oculaire, 670.
 MICROMÉTRIQUE, vis — du microscope composé, 665.
 MICRON, 670.
 MICROPHONE Hughes, 991; — Ader, 993.
 MICROSCOPE, grossissement du — composé, 651, 658; — solaire,

- 653; — simple, voy. *Loupe*; parties essentielles du — composé, 657; discussion géométrique du grossissement du —, 658; champ du —, 661; point oculaire du —, 661; anneau oculaire du —, 662; oculaire négatif d'Huyghens pour le —, 662; lentille de champ du —, 662; objectifs achromatiques, 663, à correction, 664, à immersion, 665, pour le —; description du —, 665; — inclinant, 665; choix et qualités d'un —, 667; pouvoir définissant, 667, résolvant, 667, pénétrant, 668, d'un —; mesure du grossissement d'un —, 668; micromètre objectif du —, 668; chambre claire du —, 668; mesure du diamètre réel des objets, 670; micromètre oculaire, 670; divers modèles de —, 671; — pancratique, 671; — horizontal, 671; — binoculaire, 672; correction des aberrations de réfrangibilité de l'objectif par la lentille de champ dans le —, 691; — polarisant, 799.
- MICROSCOPIQUES, mesure du diamètre réel des objets —, 670.
- MILLIAMPÈRE, 892.
- MILLIAMPÈREMÈTRES, principe des —, 1026; description des —, 1034.
- MIROIR plan, 539; image d'un point dans un — plan, 539; image d'un objet dans un — plan, 540; champ de visibilité d'un — plan, 540; champ de vision d'un — plan, 540; — tournants, 543; emploi des — tournants pour la mesure des angles, 543; — parallèles, 545; images multiples données par les — en verre, 546; — rectangulaires, 547; application des — plans, 548; — sphériques, concaves et convexes, 549; image d'un point situé sur l'axe principal d'un — sphérique concave, 549, convexe, 551; foyer principal des — sphériques, 553; formule des — sphériques, 554; plan focal principal des — sphériques, 556; construction géométrique du rayon réfléchi correspondant à un rayon incident quelconque, 556, et de l'image d'un point situé en dehors de l'axe principal, 558, dans un — sphérique; image d'un petit plan ou d'une petite droite perpendiculaire à l'axe principal d'un — sphérique, 559; construction géométrique de l'image d'une petite droite perpendiculaire à l'axe principal d'un — sphérique, 559; relation de grandeur entre un objet et son image dans un — sphérique, 560; discussion des formules des — sphériques, 561; détermination expérimentale du rayon de courbure d'un — sphérique, 565; aberrations de sphéricité des — sphériques, 568; caustiques des — sphériques, 568; aplanétisme dans les —, 569; emploi des — concaves comme réflecteurs, 570; — des télescopes, 678; — de Fresnel, 769.
- MISTRAL, 1062.
- MOLÉCULAIRES, actions —, voy. *Actions moléculaires*; pouvoirs rotatoires —, 814.
- MOLÉCULE, représentation d'une — dans un plan et dans l'espace, 806.
- MOMENT d'un couple, 23; — d'une force, 25, 26; théorème des —, 25, 26; — d'inertie, 70; — d'un aimant, 949.
- MONTAGE des lampes à arc et à incandescence en série et en dérivation, 996.
- MONTAGNES (Vent des), 1062.
- MOUFLE; équilibre de la —, 30; travail de la —, 50.
- MOULAGE de la glace, 352.
- MOUSSONS, 1061.
- MOUVEMENT, transformation du —, 4; du —, 7; loi d'un —, 7; — uniforme, 8; — varié, 9; — uniformément varié, 10; — de rotation, 11; — vibratoire ou périodique, simple ou pendulaire, 14; — vibratoire ou périodique complexe, 16; composition des — périodiques, 17;

- décomposition d'un — périodique, 18; — uniforme et uniformément varié, 40; — communiqués par la pesanteur aux divers corps, 55; nature du — de la pesanteur, 57; — d'un pendule simple, 66; loi du — d'un pendule simple, 68; — d'un corps suivant la verticale, 89; — des projectiles, 91; — des liquides dans les tubes coniques, 195; — des solides dus aux actions capillaires, 196.
- MOUVEMENT VIBRATOIRE, 14, 16; propagation d'un — dans un tuyau indéfini, 443, dans un milieu indéfini, 448; période, 449, longueur d'onde, 450, phase, 450, d'un —; variation de l'intensité du — sonore avec la distance, 451; interférence de deux — sonores de même période, 461; réflexion d'un — sur un milieu plus dense, 468, moins dense, 470; interférence de deux — sonores de périodes inégales, 471; interférence de deux — lumineux de même période, 768; détermination de la longueur d'onde des — lumineux, 771. Voy. *Vibrations*.
- MUSICAUX (Intervalles), 476.
- MUSIQUE homophone et polyphone, 477.
- MYOSPECTROSCOPE, 782.
- N**
- NATURE de la lumière, 530, 767, 784; — des radiations, 693.
- NÉGATIF, oculaire — d'Huygens, 662; cristal —, 790.
- NÉGATIVE (Épreuve), 757.
- NEIGE, 1069.
- NERF OPTIQUE, 529.
- NEUMANN, loi de — et de Dulong, 422.
- NEWTON (Loi de), 734.
- NICOL (Prisme de), 793.
- NIMBUS, 1068.
- NIVEAU, surfaces de — des liquides, 126; surfaces de — électriques, 846.
- NIVEAU D'EAU, 127.
- NODAUX (Points), voy. *Points*.
- NOEUDS de vibrations, 469; distance des — à la surface réfléchissante, 471; — dans les tuyaux fermés, 494, 498; — dans les tuyaux ouverts, 495, 496; — des cordes vibrantes 505; — dans la réflexion des ondes électriques, 1015.
- NUAGES, 1067; suspension des —, 1068, électrification des —, 1075.
- NUMÉRO, signification du — d'une lentille, 638;
- NUMÉROTAGE des lentilles, 634; passage d'un système de — à l'autre pour les lentilles, 637.
- O**
- OBJET, relation de grandeur entre un — et son image dans un miroir sphérique, 560, dans un dioptré simple, 599, dans les systèmes sphériques centrés, 621, dans une lentille sphérique, 629.
- OBJECTIF des appareils de projection, 652; — du microscope composé, 657; — achromatiques, 663; — à correction, 664; — à immersion, 665; distorsion des —, 755; champ plat des —, 755.
- OBSERVATEUR d'Ampère, 950.
- OBSERVATION, 7.
- OBTURATEUR photographique, 756.
- OCCCLUSION des gaz, 283.
- OCULAIRE du microscope composé, 657; point — du microscope composé, 661; anneau —, voy. *Anneau*; — négatif d'Huygens, 662; micromètre —, 670; — terrestre, 675.
- OCULISTES (Boîtes d'), 637.
- OEIL, de l'—, 648; — réduit, 648;
- OEUF électrique, 883.
- OHM, lois de —, 892; — 896, 1022.
- OMBRE, 532; cône d'—, 533; — électrique, 1015.
- ONDE condensante, 445; — dilatante, 446; — liquides, 448; surface d'—, 448; longueur d'—, voy. *Longueur d'onde*; interférence d'— directes et réfléchies, 468;

- réflexion d'une — sur un milieu plus dense, 468, moins dense, 470; — électriques, 1012; excitateur ou vibreur pour les — électriques, 1013; résonateur pour les — électriques, 1014; vitesse des — électriques, 1015; propagation de: — électriques, 1015; réflexion des — électriques, 1015; réfraction des — électriques 1015; double réfraction des — électriques, 1016; polarisation des — électriques, 1016; interférence des — électriques, 1015, 1016.
- OPAQUES (Corps), 531, 716.
- OPPOSITION (Groupement des éléments de pile en), 915.
- OPTIQUE, méthode — pour la mesure de la hauteur d'un son, 488; généralités sur l'—, 529; nerf —, 529; — géométrique, 531; — centre —, 622; axe — voy. *Axe optique*; — physique, 767.
- ORAGES, 1075.
- ORDINAIRE (Rayon), 790.
- OREILLE, procédés basés sur l'emploi de l'— pour la mesure de la hauteur d'un son, 483; analyse des sons complexes par l'emploi de l'— seule, 522.
- OSCILLATIONS d'un pendule simple, 67; isochronisme des petites — pendulaires, 68; — électriques, 1012; voy. *Onde*.
- OSCILLATOIRES (Décharges), 1012.
- OSMOMÈTRE, 209.
- OSMOSE des liquides, 209; — des gaz, 285; — des gaz à travers un septum poreux, 285, à travers un septum ne présentant pas de pores visibles, 288; — entre gaz et liquide à travers un septum, 290.
- OTOSCOPE de Toynbee, 453.
- OURAGANS, 1062.
- OUVERTURE d'un miroir sphérique, 549; — d'un dioptré, 590.
- OXYGÈNE (Liquéfaction de l'), 383.
- P**
- PANCRATIQUE (Microscope), 671.
- PARADOXE hydrostatique, 130.
- PARALLAXE (Effets de), 669.
- PARALLÈLES miroirs —, 545; courants —, 955.
- PARASÉLÈNES, 1071.
- PARATONNERRE de Franklin, 1078; — à pointes multiples, 1079.
- PARHÉLIES, 1071.
- PAROI FROIDE (Principe de la), 360.
- PASCAL (Principe de), 123.
- PATEUX (État), 347.
- PELTIER (Effet), 909.
- PENDULE, détermination de l'intensité de la pesanteur à l'aide du —, 65; — simple et — composé, 66; mouvement d'un — simple, 66; lois du mouvement du — simple, 68; — réversible de Kater, 70; application du — à la mesure du temps, 93; — compensateur, 310; — à gril, 310; — électrique, 828.
- PÉNÉTRANT, pouvoir — d'un microscope, 668.
- PÉNÉTRATION des gaz, 289.
- PÉNOMBRE, 532; cône de —, 533; théorie des polarimètres à —, 821.
- PERCEPTIBLES (Limites des sons), 476.
- PERCE-VERRE (Expérience du), 884.
- PÉRIODE d'un mouvement vibratoire 14, 449.
- PESANTEUR, 52.
- PESANTEUR, généralités sur la —, 54; détermination des éléments de la —, 54; direction de la —, 54; point d'application de la —, 54; intensité de la —, 55; mouvements communiqués parla — aux divers corps, 55; nature du mouvement dû à la —, 57; définition de l'intensité de la —, 63; détermination de l'intensité de la —, 63; accélération due à la —, voy. *g*; équilibre d'un solide soumis à la —, 87; action de la — sur les gaz, 213.
- PESÉE, manière de faire une —, 82; influence de la poussée de l'air sur les —, 234.
- PETIT (Loi de Dulong et), 421.
- PHASE d'un mouvement vibratoire, 450.

- PHÉNOMÈNES physiques, chimiques et biologiques, 1; cause générale des — physiques, 4; — électro-capillaires, 934; — de Kerr, 1011.
- PHONAUTOGRAPHE, 487.
- PHONOGRAMME, 527.
- PHONOGRAPHE, 527.
- PHOSPHORESCENCE, 762; lois de la —, 773; — provoquée par les rayons cathodiques, 1000.
- PHOSPHOSCOPE de Ed. Becquerel, 762.
- PHOTOGÈNES (Corps), 529.
- PHOTOGRAPHIE, 755; — des couleurs 759, 777; application de la — à l'astronomie, 759, à la géodesie, 759, à la météorologie, 759; — instantanée, 760.
- PHOTOGRAPHIQUE, chambre noire —, 755; obturateur —, 756; appareils à enregistrement —, 759.
- PHOTOPHONE, 1041.
- PHOTOMÈTRE, 700; principe des —, 700; — de Foucault, 700; — de Rumford, 700; — de Bunsen, 700.
- PIEZOMÈTRE d'Oerstedt, 172.
- PIEZOMÉTRIQUES (tubes), 161.
- PILE thermo-électrique pour l'étude des radiations calorifiques, 726; principe des — thermo-électriques, 888, 912; principe des — hydro-électriques, 888; — secondaires, voy. *Accumulateurs*; — de Melloni, 912; — Noé, 912; — Clamond, 912; emploi des — thermo-électriques pour la mesure des températures, 913; actions chimiques à l'intérieur des — hydro-électriques, 923; — du genre Volta, 924; — Volta ou à colonne, 924; — à auges, 925; — à tasses, 925; cause de l'affaiblissement des — du genre Volta, 925; conditions que doit remplir une —, 925; dé-polarisation des —, 925; — à courants constants, 926; — diverses, voy. *Éléments*; résistance d'une —, 1043; mesure de la force électromotrice d'une —, 1045, voy. *Mesure*; — étalons, 1045.
- PINCES-VALETS du microscope composé, 666.
- PIPETTE, 276.
- PLAN, équilibre sur un — incliné, 32; — incliné, 57, 64; miroirs —, voy. *Miroirs*; — focal principal d'un miroir sphérique, 556; — principal et antiprincipal des miroirs sphériques, 565; dioptré —, 579; — focaux des dioptrés simples, 596; — principal et — antiprincipaux d'un dioptré simple, 600; — cardinaux, 607, focaux, 608, principaux, 609, d'un système sphérique centré; détermination géométrique des — focaux, 609, principaux 611, d'un système sphérique centré; — focaux des lentilles sphériques, 625; — de vibration de la lumière polarisée, 784; — de polarisation, 786, rotation du — de polarisation, voy. *Polarisation* rotatoire; — d'épreuve, 832.
- PLAN-CYLINDRIQUES (Lentilles), 644.
- PLANÈTES (Spectres des), 725.
- PLAQUE, 510; vibrations transversales des —, 510; — sensible, 755.
- PLATINE de la machine pneumatique, 263; — du microscope composé, 666.
- PLUIE, 1068.
- Poids, 54; — absolu et — relatif, 73; — d'un volume déterminé de gaz, 342; — d'un centimètre cube d'air à 0° et à 76 cent., 343; — d'un volume déterminé d'air humide, 395; — réduit en eau, 410.
- POIDS SPÉCIFIQUE, absolu, 74; — relatif, 74. Voy. *Densité*.
- POINT de fusion, 348; — de solidification, 348; — critique, 356; — normal d'ébullition, 367; — principal d'un dioptré simple, 600; — antiprincipaux d'un dioptré simple, 600; — cardinaux, 607, focaux, 608, principaux, 608, nodaux, 608, antiprincipaux, 609, d'un système sphérique centré; détermination géométrique des — focaux, 609, principaux, 611,

- nodaux, 611, d'un système sphérique centré; détermination algébrique des — focaux, 616, principaux et antiprincipaux, 618, d'un système sphérique centré; — nodaux et principaux d'une lentille sphérique, 624; — nodaux et principaux de l'œil, 648; — oculaire du microscope composé, 661; — conséquents des aimants, 940, 959.
- POINTE, pouvoir des —, 835, 839, 1072; — du paratonnerre de Franklin, 1078; paratonnerre à — multiples, 1079.
- POLAIRES (Aurores), 1080.
- POLARIMÈTRE et saccharimètre, 816; théorie des — à pénombre, 821; — de Cornu et J. Duboscq, 823; — de Laurent, 824. Voy. *Saccharimètre et Diabétomètre*.
- POLARISANT (Microscope), 799.
- POLARISATION de la lumière, 783; — par réflexion, 784; plan de —, 786; — par réfraction simple, 786; angle de —, 787; — par double réfraction, 791; phénomène de — chromatique, 795, 797; principe de la théorie de la — chromatique, 796; franges de — chromatique, 797; applications de la — chromatique, 798; — rotatoire, 800; loi de la — rotatoire, 801; phénomènes de — rotatoire en lumière blanche, 802; différenciation des phénomènes de — rotatoire et de — chromatique, 803; — des électrodes, 922; force électromotrice de —, 922; — rotatoire de la lumière dans un champ magnétique, 1011; — des ondes électriques, 1016.
- POLARISCOPES, 798.
- POLARISÉE (Lumière), voy. *Polarisation*.
- POLARISEURS, 786.
- PÔLE d'un miroir sphérique, 549; — d'un dioptré, 590; — d'un élément de pile, 889; — des aimants, 939; — nord et — sud des aimants, 941; définition précise des — d'un aimant, 948; — d'un solénoïde, 957; — magnétiques terrestres, 1085.
- POLYPHONE (Musique), 477.
- POMPE à mercure, 266; — de compression, 270; — élévatoire, 273; aspirante, 273; — foulante, 274; — aspirante et foulante, 274; — à écoulement continu, 275; — à incendie, 275; — médicales, 275;
- PONTS, tunnels, 105; — de Westhorne pour la mesure des résistances, 1039, 1042, 1043.
- PORTE-OBJET, 664.
- PORTE-LUMIÈRE, 548.
- PORTE-VOIX, 459.
- POSITIF (Cristal), 790.
- POSITIVE (Épreuve), 758.
- POTENTIEL électrique, 845; unité C. G. S. de —, 846; les phénomènes électriques ne dépendent que des différences de —, 848; comparaison du — avec les indications de l'électromètre, 849; mesure des — 851; différence de —, voy. *Différence de potentiel et Mesure*; le — de l'air diffère de celui du sol, 1072; mesure du — en un point de l'air, 1072; variation du — avec l'altitude, 1073.
- POULIE, équilibre de la —, 30; travail de la —, 50.
- POUSSÉE éprouvée par un corps plongé dans un liquide, 133; centre de —, 135; — éprouvée par un corps plongé dans un gaz, 215, 217; influence de la — de l'air sur les pesées, 234.
- Pouvoir dioptrique, 637; signification du — dioptrique d'une lentille, 638; — dioptrique de plusieurs lentilles associées, 642; — définissant du microscope, 667; — résolvant du microscope, 667; — pénétrant du microscope, 668; — émissif lumineux, 697; — éclairant total, 697; inégalité du — éclairant dans diverses directions, 703; — réflecteur pour la lumière, 713; — diffusif pour la lumière, 714; proportionnalité du — émissif

et du — absorbant, 721; — émissif calorifique, 729; — émissif calorifique total, 730; mesure du — émissif calorifique relatif, 730; — émissif calorifique absolu, 730; — émissif calorifique relatif des différents corps, 731; ses variations avec l'épaisseur, 731, l'état physique, 731, l'inclinaison, 732, la température, 733; son influence sur le refroidissement par rayonnement, 734; — réflecteur calorifique, 738; — diffusif calorifique total, 739; — absorbant calorifique, 740; égalité du — émissif calorifique et du — absorbant calorifique, 742; — rotatoire, 801; relation entre le — rotatoire et la forme cristalline, 805; relation entre le — rotatoire et la constitution des corps, 805; — rotatoire et carbone asymétrique, 807; variation du — rotatoire avec la position du centre de gravité du tétraèdre représentatif de la molécule, 813; — rotatoire moléculaire, 814; — des pointes, 835, 839, 1072; — inducteur spécifique, 859.

PRÉLIMINAIRES. 1.

PRESSE hydraulique, 125.

PRESSION hydrostatique, 120; transmission des — dans un liquide, 121, 122; égalité des — dans tous les sens autour d'un point dans un liquide, 122; égale transmission des — dans tous les sens dans un liquide, 123; valeur de la — sur une surface de niveau d'un liquide, 128; — d'un liquide sur le fond horizontal d'un vase, 130; — d'un liquide sur une surface plane non horizontale, 132; — atmosphérique, sa mesure, 218, sa mesure en grammes et en dynes, 230; influence de la — sur le point de fusion, 351, sur la température d'ébullition, 367; — électro-statique, 834; variations régulières, 1057, diurnes, 1057, annuelles, 1058. accidentelles,

1058, de la — atmosphérique.

PRINCIPAL, axe —, voy. *Axe*; foyer — voy. *Foyer principal*; plan —, voy. *Plan*; point —, voy. *Point*; méridiens — voy. *Méridiens*.

PRINCIPE de la conservation de la matière, 4; — de l'inertie, 5; — fondamentaux de la dynamique, 38; — de l'égalité de l'action et de la réaction, 39; — de l'action rectiligne des forces, 39; — de l'indépendance des effets des forces simultanées, 40; — de la conservation de l'énergie, 45; — de Pascal, 123; — d'Archimède, 133; son application aux gaz, 215, 217, 234; — de la paroi froide ou de Watt, 360; premier — de la thermodynamique, 433; — de l'équivalence, 433; — de Carnot, 435; — d'Huyghens, 778.

PRISME, réfraction à travers un —, 584; angle de déviation d'un — 585; — à angle variable, 586; minimum de déviation d'un —, 586; image d'un point vu à travers un —, 587; — à réflexion totale, 588; achromatisme des —, 686; — à vision directe, 688; — de Nicol, 793; — de Jelett et Cornu, 823.

PROJECTILES (Mouvement des), 91.

PROJECTION (Appareils de), voy. *Appareils de projection*.

PROPAGATION du son, 443; nécessité d'un milieu pondérable élastique pour la —, 443; — d'un mouvement vibratoire dans un tuyau indéfini, 443, dans un milieu indéfini, 448; vitesse de — du son, 453; — de la lumière, 531; — rectiligne de la lumière dans un milieu homogène, 531; vitesse de — de la lumière 535; — des radiations lumineuses, 697, calorifiques, 728; vitesse de — des radiations calorifiques, 729; — des radiations chimiques, 745; — rectiligne des rayons cathodiques, 1000; action de l'électricité sur la — des radiations, 1011; — des ondes électriques, 1014.

PROPRIÉTÉS générales et essentielles de la matière, 4; influence de la température, 116, des actions mécaniques, 116, de la composition, 117, sur les — moléculaires des solides.

PROTUBÉRANCES, spectre des — solaires, 723.

PROXIMUM (Punctum), 649.

PSEUDOSCOPIQUE (Effet), 672.

PSYCHROMÈTRE, 385, 393; — d'August, 393; — fronde, 395; — ventilateur, 395; — enregistreur de Richard, 355.

PUISSANCE, unité de — électrique, 882; — d'un électromoteur, 896.

Puits de glace (Méthode calorimétrique du), 410.

PUNCTUM proximum, 649; — remotum, 649.

PYRHÉLIOMÈTRES, 1049.

PYROMÈTRE à levier, 293.

Q

QUALITÉS des sons, 475; — d'un microscope composé, 667.

QUANTITÉ de chaleur, 407; unité de — d'électricité, 831; batterie en —, 864; — de magnétisme, 912; unité électro-magnétique C. G. S. de — d'électricité, 1021; unité pratique de — d'électricité, 1022; mesure des — d'électricité, 1036. voy. *Mesure*.

QUARTZ, action du — sur la direction des vibrations lumineuses, 800.

R

RACÉMIQUE, 812.

RADIANT, état —, 6, 998.

RADIATIONS, étude des —, 692; nature des —, 693; émission des —, 695; — lumineuses, 697; propagation des — lumineuses, 697; intensité des — lumineuses émises par les différentes sources, 697; composition des — lumineuses émises par différents corps, 704; — calorifiques, 725; appareils pour l'é-

tude des — calorifiques, 725; propagation, 728, réflexion, diffusion, réfraction et dispersion, 729, des — calorifiques; vitesse de propagation des — calorifiques, 729; intensité, 729 et nature, 737, des — calorifiques émises par les différents corps; — chimiques, 745; lois de la propagation des — chimiques, 745; intensité et nature des — chimiques émises par les différentes sources, 746; effets des —, 749; effets calorifiques des —, 750; actions chimiques des —, 751; transformations allotropiques provoquées par les —, 751; combinaisons et réductions chimiques provoquées par les —, 752; — excitatrices et — continues 754; action des — sur les êtres vivants et sur les microbes, 760; transformation des —, 761; — inductrices et induites, 763; influence des — sur la largeur des franges d'interférence, 772; action des — sur l'électricité, 1010; action de l'électricité sur la propagation des —, 1011; intensité de la — solaire, 1049.

RADIOGRAPHIE, 1005; technique de la —, 1005; emploi d'un diaphragme pour la —, 1005; emploi d'un aimant pour la —, 1006; de l'interrupteur dans la technique de la —, 1007; du tube dans la technique de la —, 1007; tube focus pour la —, 1007; résultats de la —, 1007; — stéréoscopiques, 1008.

RADIOMICROMÈTRE de Boys, 725, 1042.

RAIES de Fraunhoffer, 684; renversement des — dans le spectre, 722; explication des — noires du spectre solaire, 722; — telluriques, 723.

RAYON lumineux, 532; détermination expérimentale du — de courbure des miroirs sphériques, 565; retour inverse des — lumineux, 578; construction géométrique du

- réfracté correspondant à un — incident quelconque dans un miroir sphérique, 556, dans un dioptré simple, 596, dans un système sphérique centré, 613, dans une lentille sphérique, 627; — excitateurs, 754; — continuateurs 754; — ordinaire et extraordinaire, 790; — cathodiques, 1000; propagation rectiligne des — cathodiques, 1000; fluorescence et phosphorescence provoquée par les — cathodiques, 1000; actions calorifiques et mécaniques produites par les — cathodiques, 1001; déviation des — cathodiques par l'aimant, 1002; — X, 1002; propriétés des — X, 1004.
- RAYONNANTE** (Chaleur), voy. *Radiations*.
- RAYONNEMENT**, 397; refroidissement par —, voy. *Refroidissement*.
- REACTION** (Égalité de l'action et de la), 39.
- RÉCEPTEUR** des télégraphes, 963; — du téléphone, 991.
- RÉCEPTRICE** (Machine Gramme), 985.
- RECOMPOSITION** de la lumière blanche, 681, voy. *Synthèse*.
- RECUIT**, 117.
- REDRESSÉS** (Courants), 971.
- RÉDUCTIONS** chimiques provoquées par les radiations, 752.
- RÉELLES** (Images), 540.
- RÉFLECTEUR** Emploi des miroirs concaves comme —, 570; pouvoir —, voy. *Pouvoir*.
- RÉFLEXION** du son, 457; — d'un mouvement vibratoire sur un milieu plus dense, 468, ou moins dense, 470; — de la lumière, 536; lois élémentaires de la — de la lumière, 537; influence de la forme de la surface réfléchissante sur la forme du faisceau réfléchi, 538; — sur les miroirs plans, 539; — sur les miroirs sphériques, 549; — totale, 575; prisme à — totale, 588; intensité et composition de la lumière réfléchie, 713; — des radiations calorifiques, 728; intensité et composition de la chaleur réfléchie, 738; intensité et nature des radiations chimiques réfléchies, 747; polarisation par —, 784; proportion de lumière polarisée par —, 787; — des ondes électriques, 1015.
- RÉFRACTAIRES** (Corps), 347.
- RÉFRACTION** du son, 459; — de la lumière, 572; lois élémentaires de la —, 572; indices de —, 574; — de la lumière à travers les surfaces planes, 579, cas d'une seule surface, 579, cas de deux surfaces parallèles ou lames à faces parallèles, 581, cas de deux surfaces inclinées, 584, voy. *Prismes*; — de la lumière à travers les surfaces courbes, 589, cas d'une seule surface, voy. *Dioptré simple*, cas d'un nombre quelconque de surface centrées, voy. *Systèmes sphériques centrés*, cas de deux surfaces centrées, voy. *Lentilles*; — astigmatique régulière, 604; — des radiations calorifiques, 729; polarisation par — simple, 786; proportion de lumière polarisée par — simple, 787; double —, voy. *Double réfraction*; — dans les corps anisotropes, 788; — des ondes électriques, 1015.
- RÉFRANGIBILITÉ**, aberrations de — dans les lentilles, 689.
- RÉFRIGÉRANTS** (Mélanges), 204.
- REFROIDISSEMENT**, Liquéfaction par — simple, 379; liquéfaction par — et par compression, 380; méthode calorimétrique du —, 418; — par rayonnement, 733; influence sur le — du pouvoir émissif du corps et de l'excès de la température du corps sur celle de l'enceinte, loi de Newton, 734; influence sur le — des dimensions, de la forme et de la nature de l'enceinte, 736; rôle de notre atmosphère pour ralentir le — du globe, 745.
- REGEL** de la glace, 351.
- RÈGLE** de Buys-Ballot, 1063.
- RÉMANENT** (Magnétisme), 944.

- REMOTUM (Punctum), 649.
 RENDEMENT d'une machine thermique, 436.
 RENVERSEMENT des raies dans le spectre, 722.
 RÉPULSIONS, lois des — électriques, 829; loi des — magnétiques, 941.
 RÉSEAUX, 780.
 RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE, 834; unités de —, 896; — d'un arc multiple, 903; unité électromagnétique, C. G. S. de —, 1021; unité pratique de —, 1022; mesure des —, 1037, voy. *Mesure*; étalons et boîtes de —, 1037; — des solides, des liquides et des gaz, 1041; — du sélénium, 1041.
 RÉSOLVANT, pouvoir — d'un microscope, 667.
 RÉSONNANCE, 458.
 RÉSONNATEURS, 519; — pour les ondes électriques, 1014.
 RÉSULTANTS (Sons), 473, voy. *Sons*.
 RÉTICULE d'une lunette, 675.
 RÉTINE, 648.
 RETOUCHES, méthode des — locales, 678.
 RETOUR inverse des rayons lumineux, 578.
 RÉVÉLATEURS, 753, 756.
 RÉVERSIBILITÉ des machines Gramme, 984.
 RÉVOLVER, monture à — pour objectifs des microscopes, 665.
 RÖNTGEN (Découverte de), 1002.
 ROSÉE, dépôt de —, 387, 737, 1066.
 ROTATION, mouvements de —, 11; composition et décomposition des —, 12; couple de —, 12; — du plan de vibration de la lumière polarisée, voy. *Polarisation rotatoire*.
 ROTATOIRE, polarisation —, voy. *Polarisation*; pouvoir —, 801, voy. *Pouvoir*.
 RUPTURE, 112; — par traction, 112; — par écrasement, 113; — par éclatement, 113; — par flexion, 114; — par actions brusques, 115; extra-courant de —, 697; étincelle de —, 994.

S

- SACCHARIMÈTRE et polarimètre, 816; — de Soleil, 816, — de Laurent, 825.
 SECONDAIRES (Axes), voy. *Axes*.
 SECTION principale d'un cristal, 790.
 SÉLÉNIUM (Résistance électrique du), 1041.
 SELF-INDUCTION, 967.
 SENS d'un courant électrique, 891.
 SENSIBILITÉ d'une balance, 79; — des thermomètres à tige, 334; — des galvanomètres, 1029.
 SENSIBLE, plaque —, 755; teinte —, 803.
 SEPTUM, diffusion à travers un —, 209; passage des gaz à travers un — poreux, 285, à travers un — ne présentant pas de pores visibles, 288; osmose entre gaz et liquide à travers un —, 290.
 SÉRIE, force électromotrice de plusieurs éléments associés en —, 889; dynamo en —, 975; montage en — des lampes à arc et à incandescence, 996.
 SERINGUE à injection hypodermique, 275.
 SERRES (Rôle des vitres dans les), 745.
 SHUNT, 1031.
 SEXTANT, 545.
 SIMOUN, 1002.
 SINUEUX (Courants), 555.
 SINUSOÏDAL, courant —, 971; machine à courants — de d'Arsonval, 979.
 SIPHON, 276; — de Sedlaczek, 277.
 SIRÈNE de Seebeck, 484; — de Cagniard de Latour, 484; — de Pelat, 486.
 SOL, température de la surface du —, 1049; influence de la nature du — sur la température de l'air, 1053; température du —, 1055; humidité du —, 1065.
 SOLAIRE, spectre —, 679, voy. *Spectre*; intensité de la radiation —, 1049.
 SOLEIL (Éclipse de), 534.

- SOLÉNOÏDE**, 955; pôles des —, 957; action d'un courant sur un —, 957; action réciproque de deux —, 958; action d'un aimant sur un —, 958.
- SOLIDE**, état —, 5; corps —, 86; généralités sur l'équilibre des —, 87; équilibre d'un — soumis à la pesanteur, 87; actions moléculaires dans les —, 94; déformations passagères ou élastiques des —, 96; déformations permanentes dans les —, 110; actions moléculaires entre —, 118; équilibre d'un — plongé dans un liquide, 134; détermination expérimentale de la densité des —, 136; densité des — solubles dans l'eau, 143; actions moléculaires entre liquides et —, 182; tension superficielle au contact d'un liquide et d'un —, 183; angle de raccordement d'un liquide et d'un —, 184; mouvements des — dus aux actions capillaires, 196; dissolution des —, 200; actions moléculaires entre gaz et —, 278; absorption des gaz par les —, 283; dilatation des —, 306; conductibilité des —, 403; chaleurs spécifiques des —, 419; vitesse du son dans les —, 457; spectres d'émission des — incandescents, 709; spectres d'absorption des —, 718; résistance électrique des —, 1041.
- SOLIDIFICATION**, généralités sur la —, 347; lois de la —, 348; point de — 348; changements de volume qui accompagnent la —, 349; influence de la pression sur le point de —, 351; chaleur de —, 424, 433.
- SOLUBILITÉ**, coefficient de — des solides, 201; coefficient de — des liquides, 205; coefficient de — des gaz, 280.
- SOLUTION**, voy. *Dissolution*.
- SOLUTIONS SALINES**, maximum de densité des —, 318; ébullition des —, 370.
- SOLVANT**, 200.
- SONNERIE électrique**, 962.
- SONOMÈTRE**, 504.
- SONORE**, diminution de l'amplitude des vibration d'un corps —, 541; des sources —, 493; tuyaux —, voy. *Tuyaux*; mouvement vibratoire —, voy. *Mouvement vibratoire*; vibrations —, voy. *Vibrations*.
- SOURCES sonores**, 493; — lumineuses, 529; température des —, 1056.
- SON**, nature du —, 439; origine du —, 439; — musical et bruit, 442; vitesse de propagation du —, 453; vitesse du — dans l'air, 454, dans les gaz (expériences de Regnault), 454, dans l'eau (Colladon et Sturm), 456, dans la fonte (Biot) 456; résultats relatifs à la vitesse du — 456; réflexion et réfraction du — 457; interférence de deux — de même période, réalisation expérimentale, 464; appareil de Kœnig pour l'interférence des —, 465; — résultants, 473, additionnels, différentiels et subjectifs, 474; qualités des —, 475; intensité d'un —, 475; hauteur d'un —, voy. *Hauteur*; timbre d'un —, voy. *Timbre*; limite des — perceptibles, 476; — harmoniques, 483; mesure indirecte de la vitesse du — dans un gaz, 500, dans un solide, 507; — simples ou pendulaires, — complexes et — composés, 511; analyse des — complexes par les flammes manométriques, 513, par la méthode graphique, 513, par influence, 516; appareil de Kœnig pour l'analyse des —, 521; analyse des — complexes par l'emploi de l'oreille seule, 522; synthèse des — 525.
- SPECTRALE** (Analyse), 711.
- SPECTRE solaire**, 679; explication du —, 680; — pur, 684; étendue du —, 692; comparaison de deux —, 709; — d'émission des solides et des liquides incandescents, 709; — continu, 710; — d'émission

- des gaz et des vapeurs incandescentes, 710; — de lignes et de bandes, 710; — d'absorption, 718; — d'absorption des solides et des liquides, 718; — d'absorption des gaz et des vapeurs, 720; renversement de raies dans le —, 722; explication des raies noires du — solaire, 722; — des protubérances solaires, 723; — des planètes et des étoiles, 725; — calorifiques d'émission, 737; — chimiques d'émission, 747; — d'interférence, 773; — normal des réseaux, 782.
- SPECTRO-COLORIMÉTRIE, 720.
- SPECTROSCOPE, 704; graduation du — en longueur d'onde, 707; divers types de —, 708; — à vision directe, 708.
- SPHÉRICITÉ (Aberration de), voy. *Aberration*.
- SPHÉRIQUE, miroir —, voy. *Miroir*; dioptré, voy. *Dioptré*; système — centré, voy. *Système sphérique centré*.
- SPHÉRO-CYLINDRIQUES (Lentilles), 644.
- STATIQUE, 19.
- STÉRÉOCHIMIE, 805.
- STÉRÉODYNAMIQUE, 89.
- STÉRÉOSCOPIQUE, effet —, 672; radiographies —, 1008.
- STÉRÉOSTATIQUE, 87.
- STÉTHOSCOPE, 453.
- STRATES dans les tubes de Geissler, 997.
- STRATUS, 1068.
- STROBOSCOPIQUE, méthode —, 440; méthode — pour la mesure de la hauteur d'un son, 492.
- SUBSTITUTION, méthode par — pour la mesure des résistances, 1039.
- SURFACE de niveau dans un liquide 126, 128; — libre d'un liquide en équilibre, 127; — de séparation de deux liquides en équilibre, 129; — de niveau dans les gaz, 215, 216; — d'onde, 248; réfraction à travers les — planes ou à travers les — courbes, voy. *Réfraction* ou *Dioptré*; — de niveau électrique, 846; — équipotentielles, 846; batterie en —, 864; groupement des électromoteurs en —, 898.
- SURFUSION, 348.
- SURSATURATION, 202.
- SUSPENSION à la Cardan, 224; — bifilaire, 851; — des nuages, 1068.
- SUSTENTATION (Base ou polygone de), 87.
- SYSTÈME C. G. S., 7; — laminaires, 182; — éclairant des appareils de projection, 653; — électrostatique d'unité C. G. S., 1020; — électromagnétique d'unités C. G. S., 1020.
- SYSTÈME SPHÉRIQUE CENTRÉ, 607; foyers conjugués d'un —, 607; points et plans cardinaux d'un —, 607; détermination géométrique des points focaux et principaux et des plans correspondants d'un —, 609, des points nodaux d'un —, 611; construction géométrique du rayon réfracté correspondant à un rayon incident quelconque dans un —, 613; construction géométrique de l'image d'un objet dans un —, 614; détermination algébrique des points focaux, 616, principaux et anti-principaux, 618, d'un —; formule des —, 620; distance focale des — 621; — équifocaux et inéquifocaux, 621; rapport de grandeur de l'image et de l'objet dans un —, 621.
- SYNTHÈSE des sons complexes, 525; — de la lumière blanche, 681, à l'aide d'un prisme, 681, d'une lentille, 682, du disque de Newton, 683.

T

TANGENTE (Boussole des), 1028.

TATE (Loi de), 193.

TÉLÉGRAPHE électrique, 962; — Morse, 963; — Hughes, 963; manipulateurs et récepteurs des —, 963.

TÉLÉPHONE à ficelle, 453; — Bell, 990, récepteur du —, 990; transmet-

- teur du —, 991; transmetteur Ader du —, 993.
- TELESCOPE, grossissement des —, 651, 672; principe des —, 671; — de Newton, 677; — de Foucault, 677; — de Grégory, 678; — de Cassegrain, 678; chercheur des —, 678; miroirs des —, 678.
- TEINTE sensible, 803; producteur des — du saccharimètre Soleil, 820.
- TELLURIQUES (Raies), 723.
- TEMPÉRATURE, influence de la — sur les propriétés moléculaires des solides, 116; correction barométrique relative à la —, 228; de la —, 294; influence de la — sur la densité d'un corps, 299; — absolue, 321; — de fusion, 347, voy. *Fusion*; — de solidification, 347, voy. *Solidification*; — critique, 356; — d'ébullition, 365, voy. *Ébullition*; influence de la — sur le pouvoir émissif calorifique, 733; influence de l'excès de la — du corps par rapport à celle de l'environnement sur le refroidissement par rayonnement, 734; équilibre mobile des —, 737; influence de la couleur des étoffes sur leur —, 751; élévation de — des conducteurs traversés par un courant, 803; emploi des couples thermo-électriques pour la mesure des —, 913; — de l'air, 1048; mesure de la — de l'air, 1048; variations de la — de l'air, 1049; variations diurnes et annuelles de la — de l'air en un même lieu, 1050; — moyenne diurne, 1052, mensuelle, 1052, annuelle, 1052; distribution des — à la surface du globe, 1052; influence de la latitude, 1052, de l'altitude, 1053, 751, du régime des vents, 1053, de la nature du sol, 1053, de la proximité des mers, 1054, sur la température de l'air; — du sol, des sources, de la mer, 1055.
- TEMPÉRÉE (Gamme), 481.
- TEMPÊTES, 1062.
- TEMPORAIRE (Magnétisme), 914.
- TEMPS, unité de —, 7; mesure du — avec le pendule, 93, avec un diapason, 508.
- TENACITÉ absolue et relative, 113; coefficient de — absolue, 113.
- TENSION sanguine, 162; force électromotrice de plusieurs éléments associés en —, 889; groupement des électromoteurs en —, 897;
- TENSION MAXIMA des vapeurs, 354; mesure des — entre 0° et 100°, 361, au dessous de 0°, 363, supérieures à la pression atmosphérique, 363.
- TENSION SUPERFICIELLE des liquides, 175; mesure de la —, 177; composante de la —, 178; expériences de Plateau sur la —, 181; — au contact de deux liquides, 182; — au contact d'un liquide et d'un solide, 183, voy. *Capillarité*.
- TERRE, induction par la —, 956; brise de —, 1062.
- TERRESTRE, lunette —, 675; oculaire —, 675; magnétisme —, 948, 1081.
- TESLA, expériences de — sur les courants de grande fréquence et de haute tension, 1016.
- TÉTRAÈDRE représentatif d'une molécule, 806; variation du pouvoir rotatoire avec la position du centre de gravité du —, 813.
- THÉORÈME de Fourier, 18, 524.
- THÉORIES physiques, 2; — de Grothius, 916; — du bombardement moléculaire, 999.
- THERMODYNAMIQUE, 432; premier principe de la —, 433; second principe de la —, 435.
- THERMO-ÉLECTRIQUE, piles —, couples —, éléments —, voy. *Piles*; courants —, 910, voy. *Courants*.
- THERMOMÈTRE, 295; — à poids, 311; application du — à poids à la mesure directe du coefficient de dilatation cubique des solides, 311; méthode du — à poids pour la mesure du coefficient de dilatation absolue, 314; méthode des — comparés pour la mesure du

- coefficient de dilatation absolue des liquides, 314; — à air, 331; — normal, 332; — à liquides, 332; application du — à poids à la mesure des températures, 332; — à tige, 333; sensibilité des — à tige, 334; — à mercure, 334; — à alcool, 335; construction du — à mercure, 335; graduation du — à mercure, 336; — construction et graduation du — à alcool, 337; — à maxima et à minima, 338; — de Six et Bellani, 338; — enregistreurs, 340; enregistreur de Richard, 340; — métalliques, 340; — métallique de Bréguet, 341.
- THERMOMÉTRIE, 330.
- THERMOMÉTRIQUE, choix du corps —, 330; choix du liquide —, 334.
- THOMSON (Effet), 909.
- TIMBRE d'un son, 475, 511; origine du — des sons, 525.
- TIROIR des machines à vapeur, 429.
- TONNERRE, 1076.
- TORRICELLI (Loi de), 156.
- TORSION, 106, angle de —, 107.
- TOUCHE, procédé de la simple —, 944, de la double —, 944.
- TOURMALINE, 794.
- TOURNIQUET hydraulique, 132; — électrique, 835.
- TRACTION, 96; lois de l'élasticité de —, 97, 99; variations de volume pendant la —, 101; — s'exerçant sur toute la surface, 102; — élastique, 109.
- TRANCHANTS (Théorie des instruments), 34.
- TRANSFORMATION des mouvements, 4; — de la chaleur en travail et — réciproque, 432; — des radiations, 749, 761; — allotropiques provoquées par les radiations, 751.
- TRANSLUCIDES (Corps), 537.
- TRANSMETTEUR du téléphone, 990; — Ader, 993.
- TRANSMISSION, rôle de l'élasticité d'une membrane courbe dans la — des pressions, 104; — des pressions dans un liquide, 121, 122; égale — des pressions dans tous les sens dans un liquide, 123; — de la lumière, 715; coefficient de — pour la lumière, 716; composition de la lumière transmise, 717; intensité et composition de la chaleur transmise, 742; coefficient de — pour les radiations calorifiques, 743; intensité et nature des radiations chimiques transmises, 748; coefficient de — pour les radiations chimiques, 748.
- TRANSPARENTS (Corps), 531, 716.
- TRANSPIRATION des gaz, 242.
- TRANSPORT électrique de l'énergie, 984.
- TRANSSUDATION, 207.
- TRANSVERSALES (Vibrations), voy. *Vibrations*.
- TRAVAIL, 42; unité de —, 44; du — en physiologie, 47; du — dans les machines simples, 48; — du levier, 48; — de la poulie, 50; — de la moufle, 50; transformation de la chaleur en — et réciproquement, 432; — électrique, 813.
- TREMBLEUR électrique, 961; — de Foucault, 987; — dans les bobines d'induction employées en médecine, 988.
- TREMPE, 116.
- TROMBES, 1080.
- TROMPE, 268; — à eau, 268; — de Sprengel, 269.
- TROPICAUX (Région des calmes), 1060.
- TUBE piézométrique, 161; écoulement des liquides dans les — capillaires, 109; lois expérimentales des — capillaires, 187; suspension d'un liquide dans un — capillaire, 171; mouvement des liquides dans les — coniques, 195; écoulement des gaz dans les — capillaires, 241; — de Mariotte, 243; — pneumatiques pour la transmission des dépêches, 273; — acoustiques, 453; — de Geissler, 883, 997; — de Crookes, 997; du — dans la technique de la radiographie, 1007; — focus, 1007; — de Tesla, 1019.

TUYAU, écoulement d'un liquide dans un — rectiligne de diamètre uniforme, 159, rectiligne de diamètre variable, 163, coudé de diamètre uniforme, 164, ramifié, 166; influence de l'élasticité et de l'extensibilité des parois d'un — sur l'écoulement d'un liquide, 167; écoulement des gaz dans un —, 239; propagation d'un mouvement vibratoire dans un — indéfini, 443; représentation graphique de l'état de l'air d'un —, 446; condensations et dilatations des tranches gazeuses d'un —, 416; vitesse d'une tranche gazeuse dans un —, 447; — sonores, 493; — à embouchure de flûte, 493; — fermés, 494; lois des — fermés, 494; — ouverts, 495; lois des — ouverts, 496; vérification expérimentale des lois des — sonores et de quelques-unes de leurs conséquences, 497; — larges, 500; — semblables, 500; loi des dimensions homologues, 501; — à anche, 501.

U

UNITÉ de longueur et de temps, 7; — fondamentales, 8; — de masse, de vitesse, d'accélération et de force, 42; — de travail, 44; — de quantité de chaleur, 408; — de quantité d'électricité, 831; — de potentiel, 846; — de capacité électrostatique, 855; — d'énergie électrique, 863; — de puissance électrique, 882; — d'intensité de courant, 892; — de résistance électrique, 896; — de magnétisme, 912; — électromagnétique d'intensité de courant, 933; divers systèmes d'— électriques, 1019; — électriques C. G. S., système électrostatique, et système électromagnétique, 1020; — électromagnétiques C. G. S. d'intensité de courant, de quantité d'électricité, de résistance, de force électromotrice ou de différence de potentiel,

de capacité électrostatique, 1021; — pratiques de résistance électrique, de force électromotrice, d'intensité de courant, de quantité d'électricité, de capacité électrostatique, 1022; rapport des — électrostatiques et des — électromagnétiques, 1022; Dimensions des —, 1023.

URO-DENSIMÈTRES, 148.

V

VALEUR EN EAU, 410.

VAPEUR, étude générale des —, 353; formation des — dans le vide, 353; — saturante, 353, 354; — non saturante, 353; tension maxima des —, 354; distinction d'un gaz et d'une —, 357; force élastique des — mélangées aux gaz, 358; force élastique d'un mélange de —, 349; force élastique d'une — saturante dans une enceinte dont la température n'est pas homogène, 360; mesure des tensions maxima de —, 361; spectre des — incandescentes, 710; manière de rendre les — incandescentes, 712; spectres d'absorption des —, 720; transmission de la chaleur à travers les —, 744; — de l'atmosphère, 1065; condensation de la — de l'atmosphère, 1065, 1066.

VAPORISATION, généralités sur la —, 352; limite du phénomène de — 355; différents modes de —, 365; chaleur de —, 425, 433.

VOLATILISATION, 365; froid produit par la —, 375.

VASE de Mariotte, 155.

VASES COMMUNICANTS, 127; méthode des — pour comparer la densité des liquides, 152.

VEINE, discontinuité de la — liquide 154; contraction de la — liquide 154; contraction de la — gazeuse, 237, 239.

VENT, influence des — sur la température de l'air, 1051; des —, 1059; direction, force, vitesse du —, 1059;

- réguliers, 1060; — alizés, 1060; — locaux, 1062; — des montagnes, 1062; — irréguliers, 1062.
- VENTRES de vibration, 470; distance des — à la surface réfléchissante, 471; — dans les tuyaux fermés, 491, 498; — dans les tuyaux ouverts, 495, 498; — des cordes vibrantes, 505; — dans la réflexion des ondes électriques, 1015.
- VERGES, 506; lois des vibrations transversales des —, 503.
- VERGLAS, 1069.
- VIBRATIONS longitudinales, 448; — transversales, 448; diminution de l'amplitude des — d'un corps sonore, 451; nœuds et ventres de —, 469; lois des — transversales des cordes, 503; — longitudinales des cordes, 506; loi des — transversales des verges, 506; — transversales des plaques, 510; — transversales des membranes, 511; forme des — sonores, 511; direction des — lumineux, 783; plan des — de la lumière polarisée, 784; action du quartz sur la direction des — lumineux, 800; rotation du plan des — de la lumière, voy. *Polarisation rotatoire*. Voy. *Mouvement vibratoire*.
- VIBRATEUR pour les ondes électriques, 1013.
- VIBRATOIRE (Mouvement), voy. *Mouvement vibratoire*.
- VIRAGE des épreuves positives, 758.
- VIRTUELLES (Images), 540.
- VISIBILITÉ, champ de — d'un miroir plan, 540.
- VISION, champ de — d'un miroir plan, 540; de la —, 648; prisme à — directe, 688; spectroscopie à — directe, 708.
- VISUEL (Angle), 649.
- Vis micrométrique du microscope composé, 665.
- VITESSE d'un mouvement uniforme, 8; — d'un mouvement varié, 9; — d'un mouvement uniformément varié, 10; composition des —, 10; décomposition des —, 10; — angulaire, 12; unité de —, 42; — d'écoulement d'un liquide, 156; — d'écoulement d'un gaz, 237, sa mesure, 239; — d'évaporation, 365; — d'une tranche gazeuse pendant la propagation d'un mouvement vibratoire dans un tuyau, 447; — du son, voy. *Son*; — de propagation de la lumière, 535; — des ondes électriques, 1015; dimension de l'unité de — 102; — du vent, 1059.
- VITRES, rôle des — dans les serres, 745.
- VOLT, 846, 1022.
- VOLTA (Expériences de), 885.
- VOLTMÈTRES, 1025.
- VOLTMÈTRES, 1044; mesure des différences de potentiel par les —, 1044; mesure de la force électromotrice d'une pile par les —, 1045.
- VOLUMÉNOMÈTRE, 256.
- VOLUMÈTRES, 146.
- X**
- X (Rayons), 1022, voy. *Rayons*.
- Z**
- ZÉRO, déplacement du — dans les thermomètres, 337.
- ZINC pur et — amalgamé, 925.
- W**
- WATT, principe de —, 360; — 882, 897.
- WÖSTYN (Loi de), 423.

FIN DE LA TABLE ALPHABÉTIQUE.



