

LIVRE VI

OPTIQUE

CHAPITRE I

Propagation de la lumière.

§ I. — DÉFINITIONS.

1. *Lumière*. — La lumière est la cause des phénomènes qui affectent chez nous le sens de la vue ; nous percevons les phénomènes produits au moyen de nos yeux.

2. *Corps lumineux*. — Les corps lumineux sont ceux qui émettent de la lumière : le soleil, les corps qui brûlent ou sont incandescents, par exemple ; comme ils émettent de la lumière qui affecte le sens de la vue, ils sont perceptibles à notre œil. Mais ils ne sont pas les seuls à jouir de cette propriété : les corps éclairés reçoivent la lumière d'une source quelconque et la renvoient ; c'est le cas de la plupart des corps naturels.

3. *Corps opaques. Corps transparents*. — Les corps opaques ne se laissent pas traverser par la lumière ; le bois, les métaux sous une certaine épaisseur ne se laissent pas traverser par la lumière. En général, si on réduit tous les corps à une épaisseur suffisamment faible, ils sont transparents, ils laissent passer la lumière.

4. *Milieu homogène*. — Un milieu homogène est un espace dont toutes les parties présentent la même composition et jouissent des mêmes propriétés.

§ II. — PROPAGATION RECTILIGNE.

1. — La lumière, dans un milieu homogène, se propage en ligne droite.

Si donc, entre un objet lumineux et l'œil, on interpose un corps opaque, la lumière est interceptée.

On appelle rayon lumineux, la direction rectiligne suivant laquelle se propage la lumière; un ensemble de rayons, constituant une sorte de cylindre lumineux ou de cône, prend le nom de faisceau. Dans le cas d'une source très éloignée les rayons sont sensiblement parallèles (soleil), le faisceau est un cylindre, la lumière est dite en faisceau parallèle. Si la source lumineuse est rapprochée, le faisceau est un cône émanant du point lumineux; la lumière est en faisceau divergent.

On verra qu'avec des appareils d'optique on peut faire converger les rayons sur un point, la lumière est dite alors en faisceau convergent.

2. *Ombres.* — Soit un point lumineux S et un corps opaque A ; si on mène un cône de sommet S tangent au corps A , ce cône détermine en arrière du corps, la zone non éclairée par la source S , puisque le corps opaque arrête les rayons lumineux. Ce cône, par son intersection avec un plan P , donne l'ombre portée par le corps A (fig. 97).

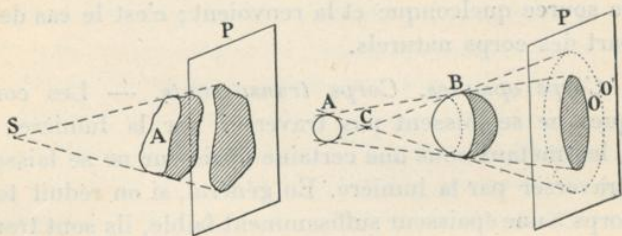


Fig. 97 et 98.

Supposons au lieu d'un point lumineux une sphère lumineuse A et une sphère opaque B ; il existe deux cônes de révolution tangents à chaque sphère (fig. 98).

Le cône qui contient les deux sphères du même côté de son sommet, c'est-à-dire le cône le moins ouvert, détermine la région où le corps A est complètement masqué par le

corps opaque B. Par intersection avec un plan P, il détermine un cercle o d'ombre ; on ne peut de l'intérieur de ce cercle o voir aucun point du corps éclairant.

Le cône de sommet c détermine, par son intersection avec P, un cercle o' ; la région comprise entre o et o' est dite la pénombre ; c'est une région où l'ombre diminue en allant de o vers o' et en tout point de cet espace annulaire oo' , on peut voir une partie du corps lumineux A.

Les cercles de contact des cônes sur le corps opaque B déterminent les régions d'ombre propre, d'où l'on ne peut voir qu'en partie ou pas du tout le corps éclairant.

3. *Application à la chambre noire.* — Si, dans une paroi d'une boîte fermée, on perce un petit trou A, il se formera sur la paroi opposée à A des images des corps lumineux. Une bougie B, par exemple, envoie de petits cônes de lumière émanant des différents points et ces cônes, par intersection avec le fond de la boîte, donnent de petites taches lumineuses dont l'ensemble constitue une image de B.

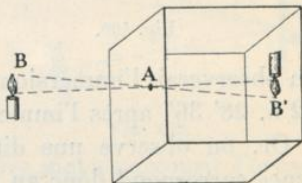


Fig. 99.

On voit immédiatement sur la figure que B' est renversée ; en outre, plus le trou A est petit, plus les taches constitutives de l'image B' sont petites, et, par suite, plus l'image est nette.

La chambre noire ainsi constituée a été le premier appareil de photographie ; on verra comment avec des lentilles on peut obtenir des images plus nettes et surtout plus lumineuses.

§ III. — VITESSE DE LA LUMIÈRE.

La lumière se propage avec une vitesse telle qu'à la surface de la terre il n'y a pas d'intervalle appréciable entre le moment où un phénomène lumineux se produit et celui

où l'œil le perceoit. Mais cette vitesse est quand même appréciable et a été mesurée plusieurs fois.

1. *Méthode de Rømer*. — Le premier satellite de Jupiter disparaît dans l'ombre de ce dernier à des intervalles égaux à 42 h. 28' 36".

Supposons que le phénomène s'observe quand la terre est en T_1 , Jupiter en J_1 ; quand la terre sera en T_2 , Jupiter en J_2 , on observera à nouveau une immersion; pendant le temps que la Terre met à aller de T_1 à T_2 , il s'est produit n immersions.

Si la propagation de la lumière était instantanée, on observerait l'immersion en T_2 , un temps égal à n fois 42 h. 28' 36" après l'immersion observée en T_1 .

Or, on observe une différence de temps; cette différence correspond donc au temps que la lumière met à parcourir $T_1 T_2$ diamètre de l'orbite terrestre.

Rømer trouva un nombre qui, corrigé postérieurement par Delambre, donna 310.000 kilomètres. En reprenant ces calculs au moyen des données astronomiques plus précises qu'on possède aujourd'hui, on trouve 299.000 kilomètres à la seconde.

2. *Méthode de Fizeau (1839)*. — Fizeau mesurait la vitesse de la lumière en cherchant le temps qu'elle mettait à parcourir deux fois la distance Montmartre-Suresnes.

Une roue dentée R tourne suffisamment vite et un rayon lumineux passe en A ; si la roue était immobile, un miroir, placé à une certaine distance normalement à la direction du rayon, renverrait le rayon lumineux exactement en A et celui-ci retraverserait la roue. Mais si pendant la durée du trajet la roue a tourné d'une dent, il se

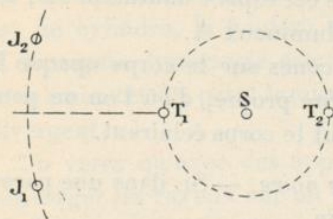


Fig. 100.

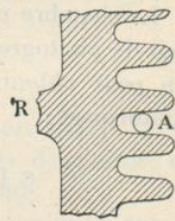


Fig. 101.

présente un plein au retour et on ne voit plus le faisceau lumineux.

Connaissant la vitesse de la roue et l'écartement des dents, on déduit la vitesse de la lumière. Fizeau avait trouvé 315.000 kilomètres.

M. Cornu en répétant ces expériences (1873-1875) trouva 298.400 kilomètres et 300.400 kilomètres dans deux séries d'expériences.

3. *Méthode de Foucault* (1850-1862). — Une source lumineuse S envoie la lumière sur un miroir mobile M ; M réfléchit la lumière sur un miroir fixe F qui la renvoie sur M ; si M était immobile, le rayon lumineux reviendrait en S.

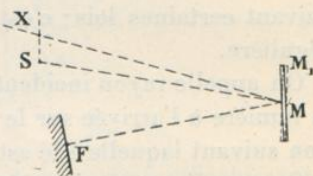


Fig. 102.

Mais M tourne très vite (jusqu'à 800 tours à la seconde).

Pendant le temps que la lumière met à parcourir l'espace $2 \times FM$, le miroir qui était en M s'est déplacé et est venu en M_1 ; le rayon réfléchi, au lieu de revenir suivant MS, revient sur MX.

On observe la distance SX et, du nombre de tours du miroir M, on déduit la vitesse de la lumière.

Foucault avait trouvé par cette méthode 298.000 kilomètres. Il s'ensuit de ces diverses expériences qu'on peut admettre le chiffre 300.000 kilomètres en moyenne comme vitesse de la lumière.

Foucault, en interposant un tube plein d'eau entre F et M, put calculer également la vitesse de la lumière dans l'eau.

Il constata que la vitesse de la lumière est plus faible dans l'eau que dans l'air.

CHAPITRE II

Réflexion de la lumière.

§ I. — DÉFINITIONS ET LOIS DE LA RÉFLEXION.

1. *Réflexion régulière.* — Quand un rayon lumineux rencontre une surface polie, il change de direction, en suivant certaines lois; c'est le phénomène de la réflexion régulière.

On appelle rayon incident la direction rectiligne que suit la lumière à l'arrivée sur le miroir, rayon réfléchi la direction suivant laquelle elle est renvoyée.

On appelle angle d'incidence et de réflexion, les angles que font ces directions avec la normale à la surface réfléchissante au point d'incidence.

Les lois de la réflexion sont les suivantes:

1^{re} Loi. — Le rayon incident et le rayon réfléchi sont dans un même plan normal à la surface réfléchissante; ce plan contient donc la normale au point d'incidence.

2^e Loi. — Les angles d'incidence et de réflexion sont égaux.

2. *Réflexion irrégulière ou diffusion.* — Quand la lumière tombe sur un corps dont la surface est imparfaitement polie, elle est renvoyée dans toutes les directions et constitue la lumière irrégulièrement réfléchie ou diffusée.

§ II. — MIROIRS PLANS.

1. *Point lumineux.* — Soit une surface réfléchissante parfaitement plane MN; un point lumineux A envoie des rayons AC, AC' réfléchis en CD, C'D suivant les lois de la

réflexion que l'on a indiquées. Par conséquent, on a l'égalité des angles : $\widehat{ACN} = \widehat{NCD}$.

Prolongeons DC jusqu'en A' à sa rencontre avec AO perpendiculaire au miroir ; les angles $\widehat{ACN}$, $\widehat{NCD}$ étant égaux, il en résulte l'égalité des angles $\widehat{ACO}$, $\widehat{OCA'}$ et les 2 triangles rectangles AOC, AOC', ayant un côté OC commun et les angles aigus en C égaux, sont égaux ; on en déduit l'égalité des côtés AO, A'O.

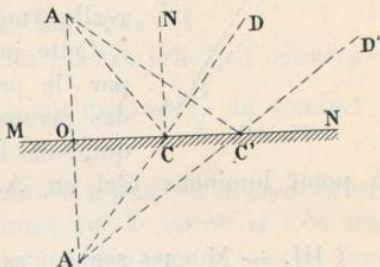


Fig. 103.

Donc un rayon réfléchi CD, quelconque, semble venir de la direction AC' symétrique de AC par rapport à la surface réfléchissante MN ; un autre rayon C'D' y passera aussi. Ce point A' semble donc être le centre du cône de lumière divergente formé par les rayons réfléchis. L'œil placé dans la région DD' serait affecté par les rayons CD, C'D' comme si le point lumineux était placé en A'.

A' est l'image du point A, et, comme elle n'existe pas réellement dans l'espace, on l'appelle *image virtuelle*.

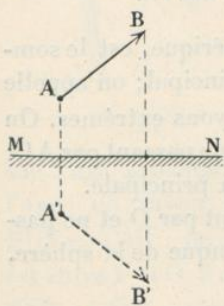


Fig. 104.

2. *Objet lumineux*. — Soit un objet lumineux AB placé devant un miroir-plan MN ; les différents points de cet objet donnent dans ce miroir des images virtuelles symétriques par rapport au plan MN.

L'ensemble de ces images virtuelles partielles constitue une image virtuelle totale de l'ensemble ; cette image est symétrique de l'objet.

3. *Images virtuelles et réelles*. — Les cas précédemment

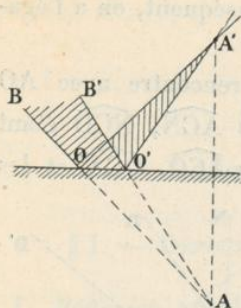


Fig. 105.

étudiées sont relatifs à la lumière en faisceau divergent ; s'il tombe un faisceau convergent sur un miroir plan, il convergera au point symétrique de celui où il aurait convergé.

On obtient donc ainsi une image réelle symétrique de l'image virtuelle.

Cette image virtuelle est formée par le prolongement hypothétique des rayons (fig. 105) tels que BA, qui, sans le miroir, auraient formé un point lumineux réel en A.

§ III. — MIROIRS SPHÉRIQUES. ÉTUDE GÉOMÉTRIQUE.

1. *Miroirs sphériques. Définition.* — Les miroirs sphériques sont constitués par une portion de sphère ou calotte sphérique ; le centre O de la sphère est le centre de courbure du miroir ; toute droite passant par ce point est normale à la surface, par suite, tout rayon passant par ce point se réfléchira sur lui-même.

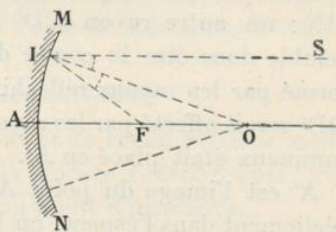


Fig. 106.

Le point A, sommet de la calotte sphérique, est le sommet du miroir ; la droite AO est l'axe principal ; on appelle ouverture du miroir l'angle $\widehat{MON}$ des rayons extrêmes. On nomme section principale une section plane passant par AO ; ainsi la figure 106 représente une section principale.

Un axe secondaire est une droite passant par O et ne passant pas par A ; donc un diamètre quelconque de la sphère, qui ne soit pas l'axe principal.

2. *Miroirs concaves. Foyer.* — Soit un miroir concave MN et un rayon lumineux SI parallèle à l'axe ; OI est la

mera en P son image; ces deux points jouissant de propriétés réciproques sont dits foyers conjugués.

Si au lieu d'être entre F et O, le point lumineux se trouvait en P_1 , entre A et F, son image serait virtuelle en P'_1 ; réciproquement le faisceau convergent de sommet P'_1 donnera une image réelle en P.

On voit immédiatement la disposition des rayons en les comparant au chemin suivi par un rayon parallèle à l'axe principal : S, I, F.

P_1 et P'_1 sont encore conjugués, mais l'un d'eux est virtuel; donc quand un des foyers conjugués dans un miroir concave est situé entre le foyer et le sommet, l'autre est virtuel.

4. *Point lumineux situé sur un axe secondaire.* — Soit un point P situé sur l'axe secondaire OA'. Il donne dans le miroir une image située sur OA' en un point P' qu'on peut déterminer facilement.

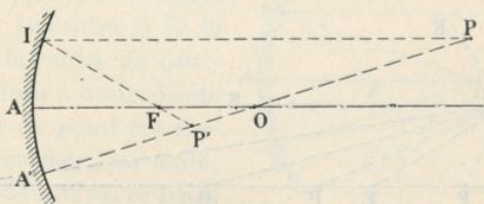


Fig. 108.

En effet, le rayon PI parallèle à l'axe principal, après réflexion, passe en F; donc par son intersection avec OA' donne P' foyer conjugué de P.

Ce foyer sera réel ou virtuel suivant la position de P, par rapport au plan perpendiculaire à l'axe et passant par F.

On voit que dans tous les cas on pourra obtenir une image réelle ou virtuelle qui sera située sur le même axe, principal ou secondaire que le point lumineux.

5. *Image d'un objet.* — Soit un objet lumineux PQ; il donnera une image dont nous pourrions déterminer la posi-

tion facilement au moyen du point situé sur un axe secondaire.

En effet, P donne une image P' , que nous déterminons

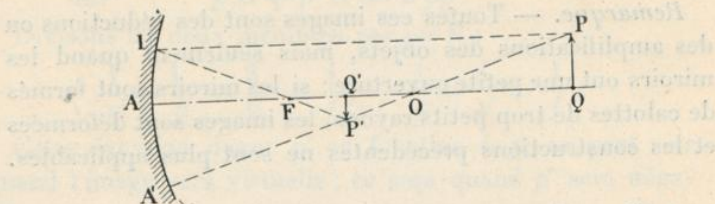


Fig. 109.

par ces deux conditions : P' est sur OP prolongé ; en outre, le rayon PI parallèle à l'axe principal passe par F . Donc l'intersection de ces deux droites donne P' .

Q' est l'image de Q et $P'Q'$ l'image de PQ ; on voit que dans cette position de PQ elle est renversée et plus petite que PQ . Réciproquement, si $P'Q'$ est l'objet lumineux, l'image sera PQ , réelle renversée et plus grande que $P'Q'$.

En faisant la construction pour un objet situé entre A et F , on trouverait une image droite virtuelle et plus grande que l'objet.

6. *Miroirs convexes.* — La théorie est identiquement la même ; on obtient un foyer principal virtuel en F au milieu de OA ; un point Q lumineux sur l'axe donne une image virtuelle en Q' .

Un objet lumineux PQ donne, au moyen de la construction de P' sur l'axe secondaire PO , le point P' . $P'Q'$ image d'un objet lumineux PQ réel est toujours virtuelle et plus petite que l'objet.

On ne pourra donc obtenir d'image réelle avec un miroir

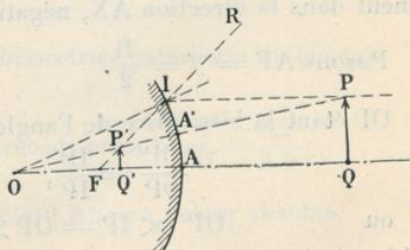


Fig. 110.

convexe qu'au moyen d'un faisceau convergent, par exemple le faisceau convergent en Q' donnera une image réelle Q .

Remarque. — Toutes ces images sont des réductions ou des amplifications des objets, mais seulement quand les miroirs ont une petite ouverture ; si les miroirs sont formés de calottes de trop petits rayons, les images sont déformées et les constructions précédentes ne sont plus applicables.

§ IV. — FORMULES DES MIROIRS DE PETITE OUVERTURE.

1. *Miroirs concaves de petite ouverture. Équation aux foyers conjugués.* — Soit P le point lumineux, P' son image ; on sait que $\widehat{PIO} = \widehat{OIP'}$.

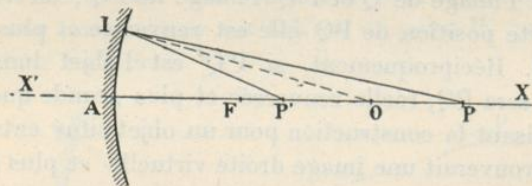


Fig. 111.

Appelons p, p' les distances AP', AP comptées positivement dans la direction AX , négativement suivant AX' .

$$\text{Posons } AF = f = \frac{R}{2}.$$

OI étant la bissectrice de l'angle $\widehat{P'OP}$, on a la relation :

$$\frac{OP'}{OP} = \frac{IP'}{IP},$$

$$\text{ou } OP' \times IP = OP \times IP';$$

si le miroir a une faible ouverture, $P'I$ est égal sensiblement à $P'A$ et PI à PA .

On a donc :

$$OP' \times AP = OP \times AP';$$

remplaçons les lignes par leurs valeurs en fonction de p , p' , f , R :

$$(R - p') p = (p - R) p',$$

ou
$$p R + p' R = 2 p p'.$$

Divisons les deux membres par $p p' R$:

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

Cette équation donne p' en fonction de p ; on peut voir quand l'image sera virtuelle; ce sera quand p' sera négatif.

Or :
$$p' = \frac{p f}{p - f}.$$

p' sera négatif quand $p < f$, c'est-à-dire quand le point lumineux sera compris entre A et F; ce qu'on avait déjà trouvé géométriquement.

2. *Miroirs convexes.* — La formule s'obtiendra de la

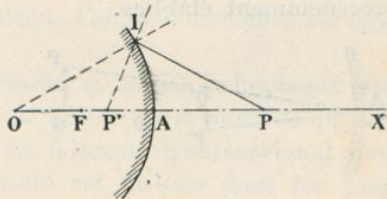


Fig. 112.

même manière. IO est la bissectrice extérieure du triangle $IP'P$; on aura donc :

$$\frac{P'O}{PO} = \frac{IP'}{IP}; \text{ comme précédemment } \frac{P'O}{PO} = \frac{AP'}{AP};$$

ou
$$\frac{R - p'}{R + p} = \frac{p'}{p}, \quad p, p' \text{ étant pris en valeur absolue.}$$

D'où : $pR - pp' = p'p + p'R; \quad pR - p'R = 2pp';$

et
$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f}; \quad p, p', f \text{ étant pris en valeur absolue.}$$

Si on remarque que, en prenant les longueurs AP , AP' positives de A vers X , négatives dans le cas contraire, p est négatif, f aussi; on a :

$$-\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = -\frac{1}{f}; p, p', f \text{ étant pris algébrique-}$$
ment;

ou
$$\frac{1}{p'} + \frac{1}{p} = \frac{1}{f};$$
 la formule est la même que dans le cas des miroirs concaves. Donc, dans tous les cas, la formule
$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$$
 est applicable, à la condition de prendre p , p' et f algébriquement, positifs dans le sens AX à partir du sommet du côté réfléchissant. La différence entre les formules des miroirs convexes et concaves est dans le signe de la distance focale.

3. *Grandeur des objets.* — Soit un objet lumineux PQ ; l'image est en $P'Q'$ et les distances AQ , AQ' sont liées par les relations précédemment établies.

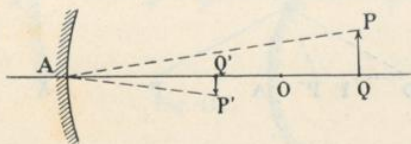


Fig. 113.

OA étant la normale en A à la surface, l'angle $\widehat{PAQ'} = \widehat{Q'AP'}$; les deux triangles APQ , $AP'Q'$ sont par suite semblables et on a :

$$\frac{PQ}{P'Q'} = \frac{AQ}{AQ'} = \frac{p}{p'}.$$

Cette relation donne le rapport des dimensions de l'image et de l'objet. Cette relation est générale et s'applique aussi au cas des miroirs convexes.

On a donc avec ces deux relations le moyen de résoudre tous les problèmes relatifs aux miroirs sphériques.

§ V. — MIROIRS PARABOLIQUES. APPLICATION
AUX PROJECTEURS.

Les relations établies dans le cas des miroirs sphériques ne sont qu'approchées et ne s'appliquent qu'à des miroirs de faible ouverture ; mais il y a un type de miroir pour lequel la convergence en un foyer des rayons tombant parallèlement à l'axe est absolue ; c'est le miroir parabolique.

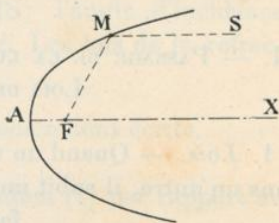


Fig. 114.

La surface réfléchissante est la surface de révolution engendrée par une parabole tournant autour de son axe AX (fig. 114).

Une droite SM parallèle à l'axe et la droite FM font en M des angles égaux avec la tangente et avec la normale à la parabole ; c'est donc le chemin que suivra un rayon lumineux, puisque l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion.

Réciproquement, si un foyer lumineux est placé en F, il enverra sur le miroir des rayons FM qui, après réflexion, constitueront un faisceau rigoureusement parallèle.

Cette propriété est utilisée dans les projecteurs électriques ; un foyer lumineux intense (lampe à arc ; cf. Électricité) est placé au foyer d'un miroir parabolique. On obtient ainsi un faisceau parallèle qui peut porter à une très grande distance.

Ces miroirs sont faits de verre poli ou de métal argenté et poli.

Le métal a l'avantage d'être plus léger et plus solide, mais il se ternit facilement.

Le verre conserve une très bonne surface réfléchissante ; mais il est fragile et peut se casser par les variations de température.

CHAPITRE III

Réfraction.

§ I. — PASSAGE DE LA LUMIÈRE D'UN MILIEU DANS UN AUTRE. LOIS DE LA RÉFRACTION.

1. *Lois.* — Quand un rayon lumineux passe d'un milieu dans un autre, il subit une déviation en franchissant la surface de séparation des deux milieux ;

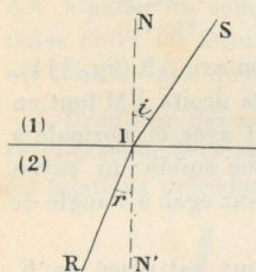


Fig. 115.

par exemple, le rayon incident SI dans le milieu (1) devient, après passage dans le milieu (2), IR dont la direction est différente de SI.

Cette déviation se fait suivant les deux lois suivantes :

1^{re} *Loi.* — Le rayon incident, le rayon réfracté et la normale à la surface de séparation au point d'incidence sont dans un même plan.

2^e *Loi.* — Quelle que soit l'obliquité du rayon incident, le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction sont dans un rapport constant. Ce rapport constant s'appelle *Indice de réfraction* du second milieu par rapport au premier.

Les angles d'incidence et de réfraction sont les angles que font les rayons incidents et réfractés avec la normale à la surface de séparation.

On a donc, dans le cas de la figure 115, $\frac{\sin i}{\sin r} = n$; n est l'indice de réfraction du milieu (2) par rapport au milieu (1). Si $n > 1$, le milieu (2) est dit plus réfringent que (1), le

rayon se rapproche de la normale. Si $n < 1$, le milieu (2) serait moins réfringent, le rayon s'écarterait de la normale.

2. *Indice inverse.* — Il y a réciproité entre le rayon réfracté et le rayon incident; si la lumière venait suivant RI, elle serait réfractée suivant IS; l'angle d'incidence deviendrait r , l'angle de réfraction i . Les lois de la réfraction donnent toujours :

$$\frac{\sin r}{\sin i} = \frac{1}{n}, \text{ d'après l'égalité précédemment écrite.}$$

Donc $\frac{1}{n}$ constitue l'indice du milieu (1) par rapport au milieu (2).

Dans le cas de la figure, $\frac{1}{n} < 1$, (1) est moins réfringent que (2), le rayon s'écarte de la normale.

§ II. — ANGLE LIMITE. RÉFLEXION TOTALE.

Considérons pour la démonstration un point lumineux

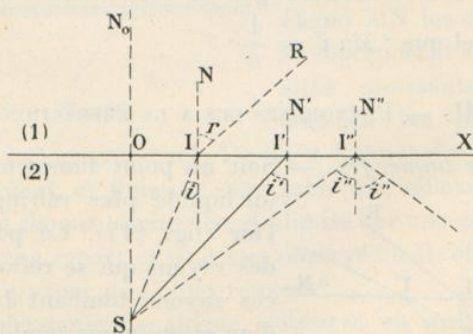


Fig. 116.

S placé dans un milieu (2) (verre par exemple) plus réfringent que (1) (air par exemple) (fig. 116).

Un rayon émané de S, tel que SI, se réfracte en IR

selon la loi $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{1}{n}$, n plus grand que 1, est l'indice de réfraction du milieu (2) par rapport au milieu (1).

Donc, l'angle r est plus grand que i ; si le point I s'écarte de O vers la droite de la figure, l'angle r croît et le rayon IR se couche sur la surface de séparation.

On arrive à un rayon limite SI' tel que :

$$\frac{\sin i'}{\sin 90^\circ} = \frac{1}{n}, \quad \sin i' = \frac{1}{n}, \text{ le rayon sort tangentiellement à la surface suivant IX.}$$

Si nous poussions au delà, la formule $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{1}{n}$ nous donnerait pour $\sin i$ des nombres plus grands que 1; il se produit un autre phénomène dit de réflexion totale; le rayon SI'' se réfléchit sur la surface de séparation suivant les lois ordinaires; il reste dans le milieu (2). Il y a réflexion totale.

Donc tous les rayons émanés de S dans le cône décrit par SI' tournant autour de SO se réfractent et sortiront. Les rayons extérieurs subiront la réflexion totale.

Ce cône est caractérisé par un demi-angle au sommet $\widehat{OSI'} = i'$ tel que : $\sin i' = \frac{1}{n}$.

§ III. — PHÉNOMÈNES DUS A LA RÉFRACTION.

1. *Objets immergés.* — Soit un point lumineux S dans un liquide plus réfringent que l'air (fig. 117). Ce point émet des rayons qui se réfractent, et ces rayons tombant dans l'œil d'un observateur semblent venir d'un point R' plus élevé que S . Il y a donc relèvement des objets immergés. C'est ainsi qu'un bâton plongé dans l'eau paraît brisé à la surface de séparation.

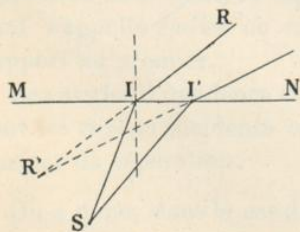


Fig. 117.

2. *Réfraction atmosphérique.* — Les différentes couches d'air sont plus ou moins denses et présentent par suite des indices de réfraction différents; le rayon lumineux émané de S, venant d'un astre quelconque, subit une série de réfractions et arrive sur la terre avec une certaine direction MR; c'est cette direction qui est apparente pour notre œil ou nos instruments. Il nous semble voir l'astre dans la direction MR.

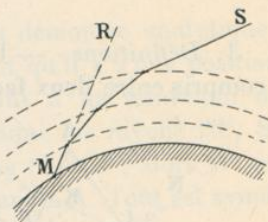


Fig. 118.

Il est donc nécessaire de corriger toutes les observations astronomiques d'un certain angle pour éliminer cette variation de la direction.

3. *Mirage.* — Le mirage est une illusion d'optique fréquente dans les pays chauds et qui fait voir l'image renversée d'objets éloignés. Monge en donna une explication.

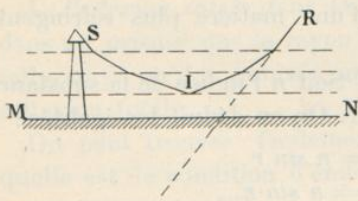


Fig. 119.

Au-dessus du sol très chaud MN les couches d'air se superposent avec des densités croissantes, car les couches les plus chaudes sont au voisinage du sol. Un objet S émet des rayons qui se réfractent et finissent par subir une réflexion totale en I, quand ils ont atteint l'angle-limite sur une couche.

Le rayon repart et peut être observé en R, offrant l'apparence d'émaner de l'objet renversé.

Un phénomène analogue s'observe en mer; dans l'air on voit l'image renversée des côtes; c'est un effet analogue, mais inverse; la mer est froide, les couches inférieures sont plus denses et la réflexion totale se produit dans les couches supérieures.

§ IV. — PRISME.

1. *Définitions.* — Un prisme est un milieu transparent compris entre deux faces planes inclinées l'une sur l'autre ;

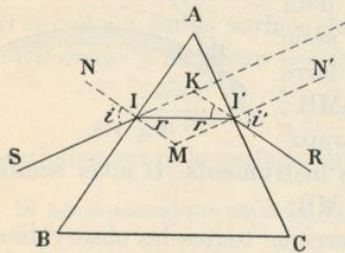


Fig. 120.

la droite intersection de ces deux faces s'appelle l'arête du prisme.

On étudie en général les phénomènes qui se passent dans un plan perpendiculaire à cette arête, ou section principale du prisme ; dans une telle section le

point A (sur l'arête du prisme) est le sommet, BC est la base.

Dans une telle section (fig. 120) un rayon lumineux arrive suivant SI, se réfracte suivant II' et ressort suivant I'R (cas d'un prisme fait d'une matière plus réfringente que l'air).

2. *Formule du prisme.* — Soit n l'indice de la substance du prisme par rapport à l'air. On en déduit les égalités :

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

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

En outre, l'angle en M du triangle II'M est supplémentaire de A (quadrilatère MI'AI inscriptible) et l'on a :

$$180 - A + r + r' = 180^\circ, \text{ donc } r + r' = A.$$

Enfin la déviation du rayon lumineux est l'angle des deux directions SI, I'R.

Cet angle

$$D = (i - r) + (i' - r') = i + i' - (r + r') = i + i' - A.$$

Les formules du prisme se ramènent donc aux quatre suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sin i = n \sin r \\ \sin i' = n \sin r' \\ A = r + r' \\ D = i + i' - A \end{array} \right.$$

qui suffisent à résoudre tous les problèmes relatifs au prisme.

3. *Minimum de déviation.* — On démontre analytiquement et on vérifie expérimentalement qu'il y a une position des rayons lumineux correspondant à un minimum de déviation. Ce minimum a lieu lorsque les rayons RI', SI sont également inclinés sur les faces : $i = i'$; alors II' est perpendiculaire à la bissectrice de l'angle A. Tout est symétrique par rapport à cette bissectrice.

Dans ce cas les formules précédentes se simplifient : D_m , i_m , r_m étant les angles correspondant au minimum, on a :

$$\begin{cases} D_m = 2 i_m - A \\ A = 2 r_m \\ \sin i_m = n \sin r_m = n \sin \frac{A}{2} \end{cases} \quad r_m = \frac{A}{2}$$

4. *Réflexion totale dans les prismes.* — Il peut arriver dans un prisme que le rayon II' tombe sur la face AC de telle sorte qu'il y subisse une réflexion totale.

On peut trouver facilement quelle est la condition d'émergence des rayons I'R.

Soit I le point d'incidence des rayons. Tous les rayons incidents se réfractent à l'intérieur d'un angle I'II'' égal à $2 r_1$, r_1 étant l'angle limite correspondant au rayon rasant la face d'entrée.

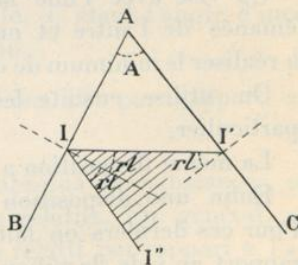


Fig. 121.

Si le rayon II' le plus élevé tombe sur AC en I' de telle façon qu'il soit réfléchi totalement, tous les autres le seront a fortiori.

Il faut pour cela que l'angle en I' soit égal au moins à r_1 c'est-à-dire dans le triangle IAI' :

$$A + 90^\circ - r_1 + 90^\circ - r_1 = 180 ;$$

ou : $A = 2 r_1$.

Pour qu'il y ait émergence des rayons, il faut que $A < 2r_1$. Donc, avec une substance plus réfringente que l'air, si $A > 2r_1$, aucun rayon ne ressortira. Ils seront tous réfléchis totalement.

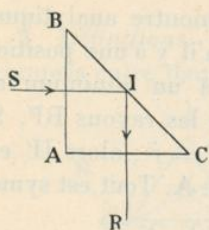


Fig. 122.

On utilise parfois dans les appareils d'optique (jumelles à prismes) des prismes à réflexion totale (fig. 122). Le rayon SI est réfléchi totalement en I et repart suivant IR. Le prisme fait l'effet d'un miroir plan, mais est bien supérieur comme quantité de lumière réfléchie.

5. *Applications du prisme.* — Le prisme a servi à la mesure des indices ; pour les solides on taille un prisme dont on mesure l'angle A. Le prisme est posé au centre d'un goniomètre, c'est-à-dire un cercle divisé muni de deux lunettes.

On vise avec l'une la lumière émanée de l'autre et on cherche à réaliser le minimum de déviation.

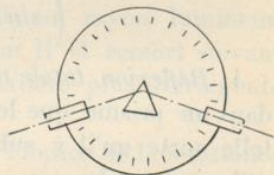


Fig. 123.

On utilise ensuite les formules applicables à ce cas particulier.

La même disposition a été appliquée aux liquides.

Enfin une disposition analogue a servi pour les gaz. Pour ces derniers on fait la détermination de l'indice par rapport au vide (le milieu (1) est le vide, le milieu (2) le gaz étudié).

Biot et Arago trouvèrent pour les gaz la loi :

$$\frac{n^2 - 1}{d} = \text{constante.}$$

d étant la densité et n l'indice absolu ; on admet plutôt maintenant $\frac{n - 1}{d} = \text{constante.}$

6. *Indices relatifs.* — Nous avons vu jusqu'ici les

indices pris par rapport à l'air et les indices pris par rapport au vide.

Supposons deux milieux contigus (1), (2) d'indices absolus n_1 , n_2 (pris par rapport au vide). L'indice relatif du milieu (2) par rapport au milieu (1) est facile à déterminer.

Pour le trouver, supposons (fig. 124) entre les deux milieux un espace vide. Le rayon lumineux suit le chemin $S I_1 I_2 R$ et les angles sont liés par les relations :

$$n_1 \sin i_1 = \sin r_1,$$

$$n_2 \sin i_2 = \sin r_2.$$

$$\text{Or, } r_1 = r_2.$$

Donc en divisant membre à membre :

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Si l'espace vide diminue d'épaisseur, la direction des rayons ne change pas ; à la limite, i_1 étant l'angle d'incidence, i_2 sera l'angle de réfraction.

$\frac{n_2}{n_1}$ est l'indice relatif du milieu (2) par rapport au milieu 1.

Connaissant donc les indices absolus des substances, on peut en déduire tous les indices relatifs. En général, on détermine au goniomètre l'indice relatif par rapport à l'air et, connaissant l'indice absolu de l'air, on calcule l'indice absolu.

§ V. — LENTILLES.

1. *Définitions.* — Les lentilles sont des milieux transparents limités par des surfaces courbes de révolution ; nous ne considérerons que les lentilles sphériques limitées par des calottes sphériques ou des plans.

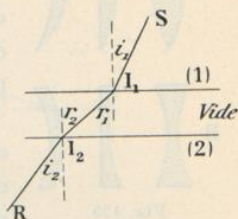


Fig. 124.

On distingue deux types de lentilles : convergentes, qui ont les bords plus minces que le centre (fig. 125-A), divergentes, qui ont les bords plus épais que le centre (fig. 125-B). Elles présentent différentes formes suivant la disposition des surfaces. En suivant l'ordre de la figure 125 on trouve les lentilles : bi-convexe, plan convexe, concave convexe ; bi-concave, plan concave, convexe concave.

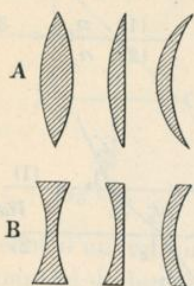


Fig. 125.

On n'étudiera que les lentilles minces, c'est-à-dire que l'on supposera l'épaisseur des lentilles négligeable vis-à-vis des distances relatives des objets et des images ; et que, de plus, les calottes sphériques ont une faible ouverture (une dizaine de degrés).

Les centres des sphères auxquelles appartiennent les surfaces terminales des lentilles sont dits centres de courbure et la ligne de ces centres axe principal. Une section principale est une section plane passant par l'axe principal ; les schémas de la figure 125 sont des sections principales.

Les lentilles sont faites généralement en deux sortes de verre : le crown-glass et le flint-glass. Le flint est beaucoup plus réfringent que le crown.

2. *Foyers principaux. Lentilles convergentes.* — Si un faisceau de lumière parallèle tombe sur une lentille parallèlement à l'axe, on observe que ce faisceau va concourir en un point F dit foyer principal de la lentille.

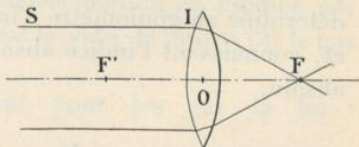


Fig. 126.

Réciproquement, si un point lumineux est placé en F , il émet des rayons que la lentille ramène parallèlement à l'axe ; elle crée donc un faisceau parallèle.

On démontre que la lentille possède deux foyers F , F' situés à des distances égales du centre O et que la longueur

OF, dans le cas d'une lentille biconvexe, est donnée par la relation :

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

n étant l'indice de réfraction de la substance qui constitue la lentille, et R, R' les rayons de courbure des deux faces de la lentille.

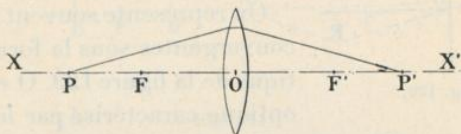


Fig. 127.

3. *Foyers conjugués.* — Si un point lumineux P est placé sur l'axe, il lui correspond un point P' tel que, si OP, OP' , distances de ces deux foyers conjugués au centre de la lentille, sont appelées p et p' , on ait la relation :

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

p étant compté algébriquement positif de O vers X , p' de O vers X' . On verrait, comme dans le cas des miroirs, que si P est entre F et O , il lui correspond un foyer P' conjugué imaginaire. Il y a également toujours réciprocité entre P et P' .

4. *Centre optique.* — On appelle ainsi un point tel que le rayon qui y passe traverse la lentille sans déviation.

Supposons pour la démonstration une lentille épaisse (fig. 128) et menons deux droites parallèles tangentes aux deux cercles de la section principale $IT, I'T'$.

Le rayon traversant II' est celui qui arrive suivant SI et ressort suivant $I'R$; les angles r et r' sont égaux (alternes internes). $i = i'$ et le rayon $I'R$ est parallèle à IS .

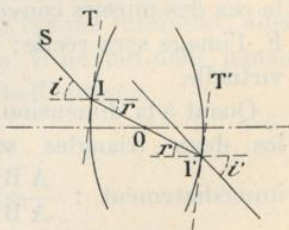


Fig. 128.

Donc le rayon n'a pas été dévié, il n'a subi qu'un petit déplacement latéral.

La droite II' coupe l'axe principal en O et si on suppose la lentille infiniment mince, les calottes sphériques de faible ouverture, ce point peut être considéré comme l'intersection du plan de la lentille avec la

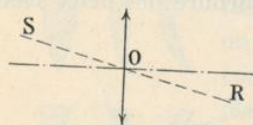


Fig. 129.

ligne des centres ou axe principal. On représente souvent les lentilles convergentes sous la forme schématique de la figure 129. O est le centre optique caractérisé par le fait qu'un

rayon tel que SO sort suivant la même direction OR .

5. *Construction des images.* — Les données précédentes permettent la construction des images ; soit un objet lumineux AB ; en menant AI parallèle à l'axe, l'image A' doit se trouver sur IF' ; le rayon AO passe sans déviation ; A' est donc à l'intersection de IF' et AO .

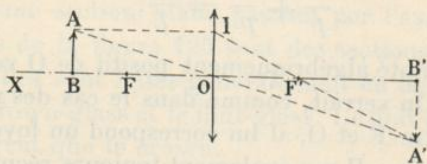


Fig. 130.

On peut faire la même discussion géométrique que dans le cas des miroirs convexes. Si l'objet AB est à gauche de F , l'image sera réelle ; si l'objet est entre F et O , elle sera virtuelle.

Quant à la dimension relative de l'objet et de l'image, les deux triangles semblables ABO , $A'B'O$ donnent immédiatement : $\frac{AB}{A'B'} = \frac{OB}{OB'} = \frac{p}{p'}$; cette relation,

jointe à $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$, permet la discussion de tous les problèmes de lentilles.

6. *Lentilles divergentes.* — Les relations et propriétés sont tout à fait analogues. Mais les foyers principaux sont virtuels (fig. 131); O est toujours le cercle optique; et la construction des images se fait d'une manière identique.

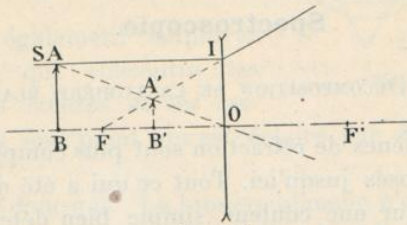


Fig. 131.

On a encore $\frac{AB}{A'B'} = \frac{p}{p'}$; mais la relation aux foyers conjugués est: $\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = -\frac{1}{f}$; avec ces deux relations on peut faire toute la discussion, comme dans le cas des lentilles convergentes.

7. *Aberrations de sphéricité.* — Les lentilles considérées jusqu'ici étaient supposées minces et de faible ouverture; fréquemment les lentilles ne sont pas telles et il en résulte que les rayons ne suivent pas la marche que l'on a indiquée précédemment. Les images formées sont alors confuses.

Pour éviter ces phénomènes, on emploie des lentilles aplanétiques, formées de deux lentilles accolées, qui, par cette disposition, réduisent les aberrations. Mais si elles les réduisent pour un sens d'arrivée des rayons lumineux, elles les augmenteraient en sens inverse. Il ne faut donc jamais retourner les verres des instruments d'optique.

CHAPITRE IV

Spectroscopie.

§ I. — DÉCOMPOSITION DE LA LUMIÈRE BLANCHE.

Les phénomènes de réfraction sont plus complexes qu'on ne les a supposés jusqu'ici. Tout ce qui a été dit est supposé établi pour une couleur simple bien déterminée ; et nous allons voir qu'il existe des couleurs complexes ; en particulier la lumière blanche, la lumière du soleil par exemple, donne des phénomènes particuliers.

Si on fait tomber sur un prisme un faisceau de lumière blanche SI, ce faisceau est réfracté dans le prisme, mais en outre, si on le reçoit sur un écran E, on constate qu'il est étalé et présente une gamme de colorations commençant par du rouge en R et variant insensiblement pour finir au violet en V. Ce sont les couleurs de l'arc-en-ciel.

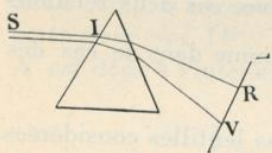


Fig. 132.

Cette gamme est ininterrompue et présente toutes les colorations intermédiaires, mais on a l'habitude de dire qu'on y retrouve sept couleurs, car nous y trouvons sept colorations qui ont un nom particulier ; ce sont dans l'ordre du spectre :

Rouge, orangé, jaune, vert, bleu, indigo, violet.

Si, au moyen d'une fente mince faite dans l'écran E, nous isolons une couleur déterminée, nous pouvons la recevoir sur un autre prisme ; on constate alors qu'elle est déviée et non dispersée ; on peut calculer son indice de réfraction.

On voit ainsi que les indices de réfraction des différentes couleurs du spectre sont différents et croissent du rouge au violet.

On peut inversement recomposer la lumière blanche ; si on met à la suite du premier prisme un second renversé (fig. 133), on annule la dispersion et on obtient le rayon de lumière primitive.



Fig. 133.

On peut également employer une lentille qui concentre les divers rayons colorés et les rassemble en un seul point qui est éclairé par de la lumière blanche.

On conclut donc que : La lumière blanche n'est pas homogène, mais formée d'un grand nombre de radiations que l'on nomme couleurs simples ou primitives. C'est en vertu de l'inégale réfrangibilité de ces couleurs que le prisme produit la décomposition de la lumière.

Couleurs complémentaires. — On nomme ainsi des couleurs qui par leur réunion forment de la lumière blanche ; si dans le spectre nous séparons les radiations en deux groupes, chacun formera par le mélange de ses couleurs constitutives une lumière colorée ; ces deux couleurs, par leur réunion, donneront la lumière blanche.

§ II. — ABERRATION DE RÉFRANGIBILITÉ. ACHROMATISME.

Les lentilles, qui réfractent la lumière comme les prismes, la décomposent également ; on a donné précédemment la valeur de la distance focale principale d'une lentille biconvexe : $\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right)$; n n'étant pas le même pour les différentes radiations, la lentille aura des foyers différents pour les couleurs du spectre.

Il en résulte que les images données par la lumière blanche sont irisées sur les bords, frangées des couleurs du spectre.

Le problème de l'achromatisme est l'obtention de lentilles

qui donnent en lumière blanche des images non irisées. On y arrive par des combinaisons de lentilles faites de différentes substances ; Dollond, opticien londonien, a le premier, en 1757, achromatisé une lentille en associant (fig. 134) une lentille biconvexe en crown-glass à une lentille convexe concave en flint.



On peut également, en associant un prisme de flint et un de crown, achromatiser le prisme ; on obtient des images déviées et sans irisation.

Fig. 134. Ces questions sont très importantes dans les instruments d'optique où les lentilles employées doivent être à la fois dénuées d'aberrations de réfrangibilité et de sphéricité.

§ III. — RAIES DU SPECTRE SOLAIRE. SPECTROSCOPE.

1. *Raies.* — Quand on produit un spectre solaire très pur, on remarque que ce spectre est sillonné de raies sombres, perpendiculaires à sa longueur ; ce sont les raies du spectre solaire.

Wollaston les signala en 1802 ; mais Fraunhofer, en 1815, les étudia avec soin et les classifia ; il donna aux plus importantes des désignations par des lettres : A, a, B, C, D, E, b, F, G, H. A est à la limite du rouge, D dans le jaune, H dans le violet. Ces raies sont toujours dans la même région du spectre solaire, elles caractérisent une radiation bien déterminée.

Elles sont d'ailleurs fort nombreuses ; Fraunhofer en comptait 354 ; Thollon, sur un spectre de 15 mètres de longueur, en signala 4.000.

2. *Spectroscope.* — C'est un appareil destiné à l'étude des spectres et particulièrement des raies.

L'appareil se compose d'un prisme P très dispersif destiné à la production du spectre ; un collimateur C est constitué par une lentille *l* au foyer de laquelle on place la

source de lumière S. On envoie ainsi un faisceau de lumière parallèle qui est décomposée par le prisme et reçue dans une lunette L.

Un micromètre M est constitué par un deuxième colli-mateur, au foyer duquel se trouvent des divisions très fines gravées sur verre.

Ces divisions sont projetées par l'appareil sur la face de sortie du prisme, s'y réfléchissent et vont dans la lunette L. Elles servent à mesurer la distance qui séparent les différentes raies.

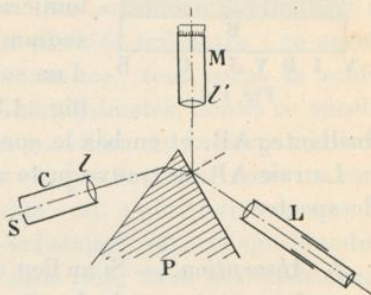


Fig. 135.

En mettant en S une source lumineuse quelconque, ou en y faisant arriver un rayon de soleil, on peut étudier les différents spectres et leurs relations.

§ IV. — ANALYSE SPECTRALE.

1. *Spectre d'un solide incandescent.* — Si nous étudions au spectroscopie le spectre d'un solide chauffé au blanc, nous obtenons un spectre analogue à celui de la lumière solaire, c'est-à-dire allant du rouge au violet, *mais sans raies*. Il est donc absolument continu et régulier.

2. *Spectre d'une vapeur.* — On peut obtenir de différentes manières le spectre des vapeurs : on obtient celui du sodium en mettant un sel de sodium quelconque dans la flamme d'un brûleur Bunsen. On peut obtenir le spectre des gaz en faisant éclater une décharge électrique dans un tube contenant ce gaz plus ou moins raréfié ; on obtient des raies brillantes, au lieu d'un spectre continu, ou une bande cannelée, suivant la pression et le régime des décharges.

Dans les cas où on obtient des raies brillantes, elles se

réfractent de la même manière que la couleur correspondante du spectre continu du solide incandescent.

Si, par exemple, nous envoyons sur le prisme d'un spectroscopie, à la partie haute, la lumière émanée de la vapeur de sodium, et, en bas, la lumière venant d'un solide incandescent, on obtient (fig. 136), en haut une raie jaune brillante, AB, et en bas le spectre continu.

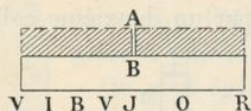


Fig. 136.

La raie AB se trouve juste au-dessus de sa couleur dans le spectre.

3. *Absorption.* — Si au lieu de séparer nos deux spectres, nous faisons passer la lumière blanche sur la vapeur de

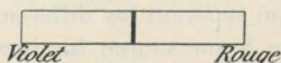


Fig. 137.

sodium, on obtient un spectre continu, mais avec une raie noire correspondant à la position de la raie brillante AB précédente.

Il y a eu absorption des radiations jaunes du spectre continu par la vapeur.

L'expérience sur un autre métal aurait donné des raies d'absorption dans une autre région du spectre. C'est ce qu'on appelle un spectre interverti.

4. *Raies du spectre solaire.* — On en conclut que les raies du spectre solaire sont dues à l'absorption produite par des vapeurs incandescentes ; mais indépendamment de celles-là, on remarque des raies variables suivant l'état de l'atmosphère ; ce sont des raies dues à l'atmosphère, ou raies telluriques.

Si donc on examine dans le spectre solaire les raies correspondant à des métaux connus, on observe la présence du sodium, du fer, du calcium, du magnésium, du chrome,

du nickel, etc. On peut en conclure que le soleil forme une masse à très haute température entourée de vapeurs incandescentes.

5. *Analyse spectrale*. — Une substance particulière est caractérisée par son spectre de raies brillantes : ce spectre est caractéristique de la substance ; tout corps la renfermant, même en quantités infinitésimales, donne ce spectre, mélangé à celui des autres constituants du corps ; inversement, si cette substance n'est pas contenue dans un corps soumis à l'analyse spectrale, on n'obtiendra aucune des raies caractéristiques de la substance ; on a vu que le sodium donnait une raie jaune ; cette raie, avec des instruments puissants, se dédouble en deux raies jaunes voisines.

D'autres corps donnent des raies nombreuses : le strontium donne huit raies : six rouges, une orange, une bleue. Si on met un sel métallique complexe dans un bec Bunsen, on peut, par l'étude de son spectre, déterminer les métaux qui y entrent.

La présence de raies inconnues a conduit à la découverte de métaux nouveaux : rubidium et césium (Kirchhoff et Bunsen), thallium (Crookes), indium, gallium.

§ V. — MÉTÉORES LUMINEUX.

1. *Arc-en-ciel*. — L'arc-en-ciel paraît dans les nuages opposés au soleil quand il tombe de la pluie ; il est formé d'arcs concentriques présentant successivement les couleurs du spectre solaire. Parfois on observe deux arcs concentriques, le cercle intérieur est plus vif que le cercle extérieur ; en outre, dans le cercle intérieur les couleurs vont du violet au rouge, en allant vers l'extérieur ; dans le cercle extérieur, l'ordre est inverse. La théorie indique qu'il peut exister plusieurs arcs-en-ciel, mais rarement on en voit plus de deux.

Le phénomène est dû à la réflexion du soleil dans les

gouttes de pluie et à la décomposition de la lumière blanche qui résulte du passage dans l'eau des rayons lumineux. On observe le même phénomène dans les jets d'eau, dans la rosée, etc., dans tous les cas où se trouvent des gouttes d'eau.

On voit sur la figure 138 la possibilité du phénomène ; un rayon SI arrive dans une goutte d'eau où il se réfracte ;

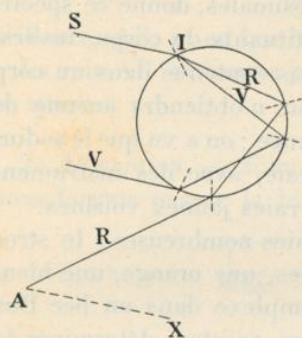


Fig 138.

il se décompose en même temps par suite de l'inégale réfrangibilité des couleurs ; les différents rayons lumineux se séparent et se réfléchissent sur la face interne de la goutte ; ils ressortent suivant les directions V et R.

L'œil placé en A voit suivant R du rouge ; suivant la direction AX il verrait du violet, provenant d'une autre goutte

dans la direction AX. On a donc un arc allant du violet au rouge. Ce phénomène se produit pour toutes les gouttes situées dans un plan perpendiculaire à la direction du soleil et équidistantes de l'observateur ; car elles peuvent donner toutes la même construction de rayons lumineux. Suivant le nombre de réflexions dans les gouttes, on obtient le deuxième ou le troisième arc.

2. *Halo*. — C'est un cercle irisé, simple ou double, concentrique au Soleil ou à la Lune ; le halo est expliqué par la décomposition de la lumière dans de petits prismes de glace qui constituent certains nuages. C'est un effet absolument analogue à celui qui produit l'arc-en-ciel.

Il ne faut pas confondre ces halos avec ce qu'on appelle vulgairement halo et qui est une lueur confuse entourant la lune, due à la présence de nuages qui créent des dispersions de lumière et troublent la netteté des bords ; ce n'est en somme que de la lumière diffusée.

CHAPITRE V

Instruments d'optique.

§ I. — OEIL HUMAIN.

Avant de décrire les instruments d'optique, il est nécessaire de donner quelques notions succinctes sur l'œil, qui nous permet de prendre connaissance des objets lumineux et éclairés.

L'œil n'est autre qu'une chambre noire, où une lentille L ou cristallin forme les images renversées des objets lumineux sur le fond du globe de l'œil en R, ou rétine constituée par l'épanouissement du nerf optique.

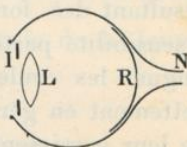


Fig. 139.

Devant le cristallin, en I, se trouve l'iris, sorte de diaphragme qui s'ouvre et se ferme instinctivement suivant l'abondance de lumière ; ouvert en grand dans l'obscurité, il est très réduit dans le grand jour.

Tous les objets n'étant pas à la même distance, les images ne se formeraient pas avec la même netteté, si le cristallin L était invariable ; suivant la distance, l'œil *accommode* le cristallin ; c'est un muscle spécial qui produit des changements de courbure du cristallin et arrive à former sur la rétine par ce procédé des images nettes.

L'œil normal peut accommoder pour des distances variant depuis des milliers de mètres jusqu'à quelques centimètres ; quand, avec l'âge, l'œil se fatigue, il ne peut plus accommoder pour les courtes distances : il est presbyte. Il faut aider le cristallin avec une lentille convexe qui augmente sa convergence.

Si l'œil est trop allongé, l'image se forme en avant de la

réfine, à moins que l'objet observé ne soit très rapproché de l'œil. C'est la myopie ; on la corrige par une lentille divergente qui, diminuant la convergence de l'œil, permet la formation des images plus loin du cristallin.

Le défaut inverse constitue l'hypermétropie ; les images se forment derrière la réfine ; sauf quand les objets sont très éloignés, alors l'image peut se former sur la réfine ; on corrige ce défaut comme la presbytie par l'emploi de lentilles convergentes.

L'astigmatisme est le défaut d'un œil qui est déformé ; il peut être myope dans le sens vertical, tout en restant normal dans le sens horizontal ; on compense ce défaut par des verres cylindriques qui corrigent l'inégalité.

Enfin, l'achromatopsie ou daltonisme n'est pas un défaut résultant des formes de l'œil ou du cristallin ; c'est une insensibilité particulière de la réfine qui l'empêche de distinguer les couleurs. Les contours des objets sont vus nettement en général par les daltoniens, mais les teintes ne leur paraissent pas distinctes.

§ II. — LOUPE.

Soit une lentille convergente L , et un petit objet AB ; on place la lentille devant AB de façon que celui-ci soit très rapproché du foyer, tout en restant entre F et O .

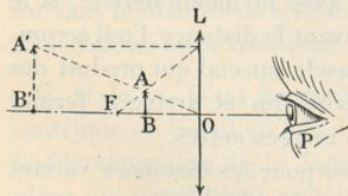


Fig. 140.

On obtient ainsi une image virtuelle $A'B'$, plus grande que AB , d'où semblent émaner les rayons pour l'œil placé en P ; cela permet d'avoir une image

$A'B'$ à distance PA' convenable pour la vision de l'œil et plus grande que l'objet.

La loupe et l'objet seront donc placés plus près de l'œil qu'il ne convient pour les voir, l'objet entre le foyer F et la

lentille, et l'image se formera en $A'B'$ à bonne distance de vision, soit 25 ou 30 centimètres.

Le grossissement est le rapport de l'image à l'objet, soit :

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{OB'}{OB}.$$

On a calculé ce rapport dans la théorie des lentilles convergentes :

$$\frac{OB'}{OB} = \frac{p'}{p};$$

ici on peut le simplifier en vertu de la remarque suivante ; AB est placé très près du foyer F ; on peut admettre qu'il est à ce foyer : $OB = f$; l'œil est placé très près de la lentille, on peut admettre que l'œil est en O . Si Δ est la distance de vision distincte, on a pour expression du grossissement : $G = \frac{\Delta}{f}$; plus la distance focale de la loupe sera faible plus le grossissement sera fort.

§ III. — MICROSCOPE COMPOSÉ.

La loupe ne permet guère de dépasser un grossissement de 100 ; pour obtenir des grossissements plus forts, on se sert du microscope composé qui substitue aux objets une image virtuelle renversée et amplifiée.

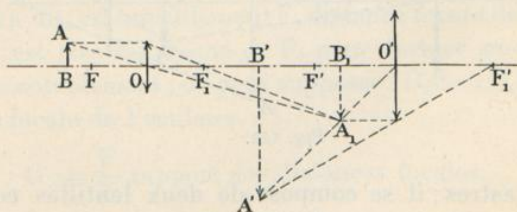


Fig. 141.

La figure 141 montre la disposition schématique de l'appareil qui se compose de deux lentilles convergentes O et O' , O étant l'objectif, O' l'oculaire.

L'objet est placé en AB à l'extérieur de OF , mais près de F . Il donne donc une image A_1B_1 réelle et agrandie, comme l'indique la construction de la figure.

Cette image A_1B_1 tombe entre le foyer F' et le centre optique O' de l'oculaire qui en donne une image virtuelle $A'B'$, observée par l'œil placé dans la région $O'F_1'$.

Grossissement. — Le grossissement peut se définir comme dans la loupe par le rapport $\frac{A'B'}{AB}$; $A'B'$ se forme à une distance $O'B'$ sensiblement égale à la distance de vision distincte. Ce rapport peut s'écrire $\frac{A'B'}{A_1B_1} \times \frac{A_1B_1}{AB}$; c'est le produit des grossissements des deux lentilles.

Connaissant $O'B'$ on peut en déduire $O'B_1$; d'où OB_1 et OB . On peut donc calculer en fonction des distances focales le grossissement de l'appareil. Généralement on le détermine expérimentalement, plutôt que de le calculer.

§ IV. — LUNETTES ASTRONOMIQUE ET TERRESTRE.

1. *Lunette astronomique. Formation des images.* — Cet appareil est destiné à la vision des objets éloignés, en parti-

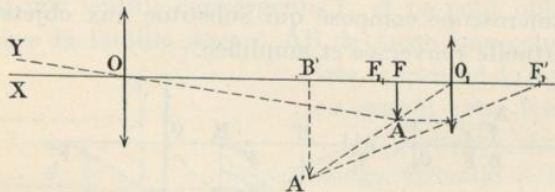


Fig. 142.

culier des astres; il se compose de deux lentilles convergentes, l'une O formant objectif, l'autre O_1 formant oculaire.

L'objet observé étant très éloigné donne dans O une image dans le plan focal de l'objectif, en FA . Cette image FA , tombant entre le foyer F_1 et le centre optique O_1 de la

lentille oculaire, donne une image virtuelle agrandie $B'A'$ qui est observée par l'œil placé dans la région O_1F_1' .

On voit que cet appareil donne des images virtuelles et renversées ; on ne peut plus dire agrandies, car les objets observés placés très loin sont souvent de dimensions considérables.

2. *Grossissement.* — Par ce fait même on ne peut plus définir le grossissement par le rapport des images et des objets comme dans le cas des loupes et microscopes. On définit le grossissement dans les lunettes : le rapport du diamètre apparent de l'image vue dans la lunette, au diamètre apparent de l'objet vu à l'œil nu ¹.

Sur la figure 142 on voit que le diamètre apparent de l'image, en supposant l'œil placé en O_1 ce qu'on a supposé déjà plusieurs fois, est : $\widehat{B'O_1A'}$.

Le diamètre apparent de l'objet est $\widehat{XOY}$, car, l'objet étant très éloigné, on peut supposer l'œil qui observe sans instrument placé en O .

On a donc :

$$G = \frac{\widehat{B'O_1A'}}{\widehat{XOY}} = \frac{\widehat{FO_1A'}}{\widehat{FOA}} ; \text{ or } tg \widehat{FO_1A'} = \frac{FA}{FO_1} ; tg \widehat{FOA} = \frac{FA}{FO}.$$

En remplaçant les angles par leurs tangentes, $G = \frac{OF}{FO_1}$. OF , on l'a dit, est sensiblement F , distance focale de l'objectif ; FA est très rapproché de F_1 pour former une image agrandie notablement ; on peut supposer : $O_1F = O_1F_1 = F_1$, distance focale de l'oculaire.

$$G = \frac{F}{F_1} \text{ rapport des distances focales.}$$

3. *Mesure du grossissement. Anneau oculaire.* — On supposera pour plus de simplicité les foyers F et F_1 confondus, ce qui est presque réalisé, a-t-on vu précédemment.

1. C'est-à-dire l'angle sous lequel on voit l'objet.

L'objectif O éclairé par l'objet observé joue par rapport à l'oculaire O_1 , le rôle d'un objet lumineux et donne dans cet oculaire une image LM réelle et rapetissée; si on déplace une feuille de papier sans la région O_1LM , en attei-

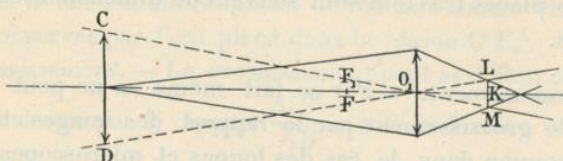


Fig. 143.

gnant le plan LM on obtiendra une image très nette, un cercle petit et très lumineux.

On voit d'ailleurs sur la figure 143 que c'est le point où le cône de lumière émergeant de O_1 présente la section la plus faible.

On a les deux relations:

$$\frac{LM}{CD} = \frac{O_1K}{OO_1} = \frac{O_1K}{F + F_1}; \quad \frac{1}{O_1K} + \frac{1}{OO_1} = \frac{1}{F_1};$$

ou: $\frac{1}{O_1K} + \frac{1}{F + F_1} = \frac{1}{F_1}; \quad O_1K = \frac{F_1(F + F_1)}{F};$

d'où: $\frac{LM}{CD} = \frac{F_1}{F} = \frac{1}{G}.$

En mesurant CD d'une part et LM au moyen d'une plaquette de verre dépoli sur laquelle sont tracées des divisions très fines (Dynamètre de Ramsden), on obtient par leur rapport le grossissement G .

4. *Clarté dans les lunettes.* — C'est le rapport des quantités de lumière reçues sur la rétine en observant un objet à la lunette et à l'œil nu. Il y a deux cas à considérer: a) celui étudié où il y a un grossissement; b) celui où l'objet n'a pas de diamètre apparent (étoiles); on ne peut dans ce dernier cas définir le grossissement.

a. Diamètre apparent sensible. — La quantité de lumière envoyée par l'unité de surface de l'objet est proportionnelle à la surface de l'objectif; soit 1 l'intensité du faisceau envoyé par l'unité de surface de l'objet, l le diamètre de l'objectif, on pourra prendre $\frac{\pi}{4} l^2$ comme quantité de lumière pénétrant dans l'objectif. Mais cette quantité s'éparpille sur un objet G fois plus grand linéairement, donc G^2 fois plus grand superficiellement.

La quantité de lumière relative à l'unité de surface de l'image est donc : $\frac{\frac{\pi}{4} l^2}{G^2}$.

D'autre part, si on observe à l'œil nu, la quantité de lumière sera proportionnelle à la surface de la pupille $\frac{\pi}{4} \omega^2$ (ω diamètre de la pupille).

La clarté est donc :

$$\frac{l^2}{G^2} \cdot \frac{1}{\omega^2}.$$

Si a est le diamètre de l'anneau oculaire, on sait que : $G = \frac{l}{a}$; la clarté est donc : $\left(\frac{a}{\omega}\right)^2$ rapport des carrés des diamètres de l'anneau oculaire et de la pupille.

Ce rapport est plus petit que 1 dans les lunettes; donc les objets sont grossis mais paraissent moins lumineux.

b. Pas de diamètre apparent sensible. — On suppose l'œil dans le plan de l'anneau oculaire; comme cet anneau est plus petit que la pupille, et que tous les rayons tombant dans la lunette y passent, toute la lumière reçue sur l'objectif tombe dans l'œil.

Cette lumière est proportionnelle à la surface de l'objectif $\frac{\pi}{4} l^2$.

À l'œil nu, on recevrait une quantité proportionnelle à

la surface de la pupille $\frac{\pi}{4} \omega^2$. Donc la clarté est : $\frac{l^2}{\omega^2}$, considérablement > 1 .

Les étoiles paraîtront donc bien plus lumineuses parce qu'elles ne sont pas grossies ; on pourra en voir qui seraient invisibles à l'œil nu.

5. *Lunette terrestre.* — La lunette terrestre ou longue-vue est une modification de la lunette astronomique destinée à permettre la vision droite des objets. Cette modification consiste dans l'interposition, entre l'objectif et l'oculaire, de deux verres convergents formant un système appelé véhicule.

La figure 144 représente l'appareil modifié, l'oculaire étant supposé enlevé.

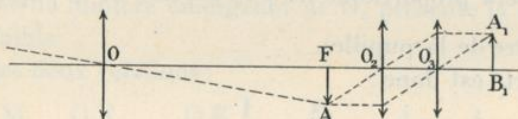


Fig. 144.

Les deux lentilles supplémentaires O_2O_3 sont placées à une distance O_2O_3 égale à leur distance focale commune ; de plus O_2F est aussi égal à leur distance focale.

L'objet donne dans l'objectif, à son plan focal F , l'image FA ; cette image réelle donne, dans le système O_2O_3 , une deuxième image réelle A_1B_1 égale à AF et droite. La construction résulte immédiatement de la propriété : $O_2F = O_2O_3 = O_3B_1 = f$, distance focale commune des deux lentilles O_2O_3 .

Cette image A_1B_1 est observée avec l'oculaire comme précédemment. Il n'y a donc rien de changé aux théories précédentes.

En pratique l'oculaire est formé de deux lentilles et l'ensemble du véhicule et de l'oculaire, invariable comme distance relative de ses différents verres, est déplacé par rapport à l'objectif pour la mise au point.

§ V. — LUNETTE DE GALILÉE.

Cette lunette par l'accouplement de deux appareils identiques constitue la lorgnette de spectacle.

L'objectif supposé à gauche de la figure 145 donne à

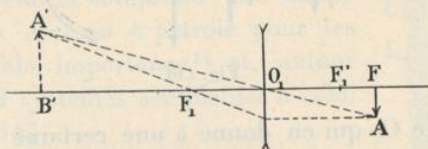


Fig. 145.

son foyer F une image réelle et renversée d'un objet éloigné.

Cette image tombe au delà du foyer F'_1 de l'oculaire qui est constitué par une lentille divergente; on obtient ainsi une image $A'B'$ virtuelle et droite.

Si FA est suffisamment rapproché de F'_1 , l'image $A'B'$ sera très agrandie.

Le grossissement sera comme précédemment, en supposant F confondu avec F'_1 : $G = \frac{F}{F'_1}$.

En pratique les lentilles sont formées, pour achromatiser l'appareil, l'objectif, d'une lentille biconcave en flint serrée entre deux biconvexes de crown; l'oculaire d'une lentille biconvexe en flint entre deux biconcaves en crown.

§ VI. — APPAREILS DE PROJECTION.

Ce sont des instruments destinés à projeter sur un écran des images réelles et amplifiées des objets. Le prototype est la lanterne magique qui renferme le principe de tous ces appareils.

Une source de lumière S envoie ses rayons au moyen

d'un réflecteur concave R dont elle occupe le foyer, sur une lentille O_1 ; cette lentille concentre les rayons lumineux sur l'objet transparent A qui est fortement éclairé. Il est placé un peu au delà du foyer F d'une deuxième lentille

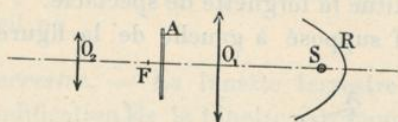


Fig. 146.

convergente O_2 qui en donne à une certaine distance une image réelle et très agrandie qu'on reçoit sur un écran.

On peut calculer le grossissement de l'appareil par les formules ordinaires des lentilles convexes.

Le microscope solaire est un appareil analogue : un réflecteur plan envoie un large faisceau de lumière sur un système convergent qui le concentre sur l'objet à projeter; celui-ci placé comme A par rapport à O_2 donne une image réelle et très agrandie.

§ VII. — PHARES.

Les phares sont destinés à éclairer à une grande distance ; pour éviter la dispersion des rayons lumineux, une source lumineuse puissante est placée au foyer d'une lentille de manière à envoyer un faisceau cylindrique.

Mais il faut éviter les aberrations de sphéricité et l'absorption que produirait un verre trop épais. Les lentilles à échelons permettent de réaliser ces conditions.

Une lentille plan-convexe de faible ouverture L est placée au centre de l'appareil ; tout autour se trouvent une série d'anneaux ABC , qui sont des morceaux de lentilles dont le foyer coïncide avec celui de L .

Les faces postérieures de tous ces éléments sont planes et placées dans le plan postérieur de la lentille L .

On obtient ainsi un appareil optique ayant un foyer

unique et une faible épaisseur; il en résulte l'absence d'aberrations de sphéricité et d'absorption par le verre. Parfois des miroirs annulaires tels que M complètent l'installation pour réfléchir les rayons qui tomberaient en dehors de la lentille.

Cet ensemble ne constitue qu'une partie du phare; celui-ci comprend une lampe (électrique à arc, ou à pétrole pour les feux de faible importance¹⁾) et, autour d'elle, 5 ou 6 systèmes semblables à celui de la figure 147.

Le système optique est fixe dans les feux fixes ou mobile dans les feux à éclats; il tourne alors d'un mouvement régulier. L'appareil est monté soit sur galets, soit sur une masse de fer flottant dans du mercure, afin d'avoir aussi peu de frottements que possible.

Si l'appareil est à éclipses, à éclats de couleur, ou à secteurs colorés, des écrans opaques ou colorés, fixes ou mobiles permettent de réaliser les durées d'éclipse et d'éclats.

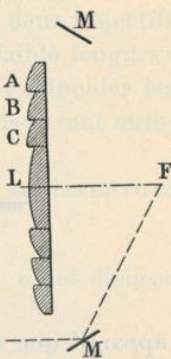


Fig. 147.

§ VIII. — TÉLÉMÈTRES.

Les télémètres sont des appareils destinés à mesurer les distances. On peut les classer suivant leur principe en trois groupes: télémètres à dépression, télémètres à base, télémètres à mesure d'image.

1. *Télémètres de dépression.* — Supposons une lunette placée en A, sur une côte par exemple; elle est située à une hauteur $CA = H$ au-dessus du niveau de la mer.

On vise un point éloigné, un navire par exemple, à la distance $CB = L$. Si φ est l'angle BAC, on a: $L = H \operatorname{tg} \varphi$.

1. Les lampes à pétrole sont souvent munies de manchons Auer.

H peut être connu et φ mesuré. On en déduit L .

Pour que l'appareil soit précis, il faut que la hauteur H soit suffisamment grande; on ne pourra donc utiliser cet

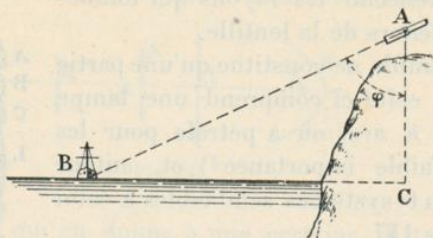


Fig. 148.

appareil que sur une côte élevée ou dans la mâture d'un bâtiment.

En outre, si l'observation est faite sur une côte où la mer a des marées, la hauteur CA varie; il faudra donc des tables donnant les corrections suivant la hauteur de la marée.

Cet appareil est en principe un des télémètres qu'emploie l'artillerie de côte pour les batteries hautes (télémètre Audouard).

2. *Télémètre à base.* — Supposons qu'on ait en deux points d'un rivage placé deux observateurs à une distance connue dite base du télémètre.

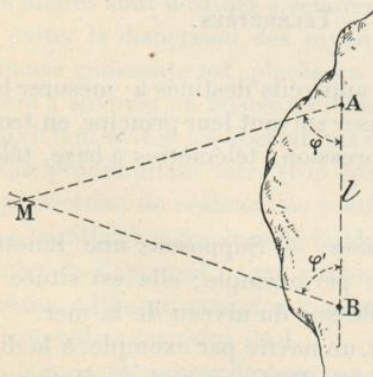


Fig. 149.

Soient par exemple les deux postes A, B ; avec deux lunettes on vise un point M , ce qui permet de mesurer les angles φ et φ' .

Connaissant ces angles et la longueur l , on peut trigonométriquement ré-

soudre le triangle ABM , et par suite déterminer les distances AM, BM .

Une table à double entrée, construite pour une base donnée, peut servir à déterminer rapidement les distances en fonction de φ et φ' .

On a construit des appareils portatifs où deux objectifs se trouvent aux extrémités d'une base de faible longueur (1 mètre). Un seul observateur reçoit et fait coïncider les images des deux objectifs et les distances s'inscrivent automatiquement (télémètres Barr et Stroud).

Ces appareils sont fréquemment employés sur les navires de guerre.

3. *Appareils à mesure d'images.* — Un objet éloigné



Fig 150.

(fig. 150) AB donne une image A'B' dans une lentille L ; le grossissement défini comme pour la loupe est :

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{p'}{p}; \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f},$$

p et p' étant respectivement OB et OB'.

Or :

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

Donc :

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{p}{p-f}.$$

Si on connaît la dimension de AB, on peut mesurer A'B' et de l'égalité précédente on tire p , la distance cherchée.

L'image A'B' est reçue sur une lame de verre portant des graduations et on l'examine avec une deuxième lentille faisant objectif.

Il faut pour utiliser cet instrument connaître la grandeur de l'objet mesuré, la hauteur des mâts d'un bâtiment par exemple ; il n'est d'ailleurs pas très précis pour des distances considérables.

