

IX. Les tuyaux sonores que l'on emploie dans les jeux d'orgues et dans tous les autres instruments à vent se divisent, d'après le mode employé pour mettre en vibration l'air qu'ils renferment, en tuyaux ou en instruments à *bouche* et en tuyaux ou en instruments à *anche*. Ces tuyaux peuvent être ouverts ou fermés.

X. Lorsqu'on fait varier la vitesse du courant d'air à l'aide duquel on fait parler un tuyau *ouvert*, ce tuyau peut rendre successivement différents sons qui suivent la série naturelle des nombres 1, 2, 3, 4, 5,..... Si le tuyau est *fermé*, les sons produits suivent la série impaire 1, 3, 5, 7,.....

XI. Le son fondamental, ou le plus grave que donne un tuyau fermé, est toujours à l'octave *au-dessous* du son fondamental produit par un tuyau ouvert de même longueur et de même diamètre.

XII. Le diapason est un instrument qui donne une note invariable (*la<sub>2</sub>*), d'après laquelle on accorde tous les autres instruments de musique.

## CHAPITRE XXVI.

### OPTIQUE.

Propagation de la lumière dans un milieu homogène. — Ombre. Pénombre. — Vitesse de la lumière. — Mesure des intensités relatives de deux lumières. — Lois de la réflexion. — Miroirs plans. — Miroirs sphériques concaves et convexes.

#### Propagation de la lumière dans un milieu homogène.

362. *Optique*. — On donne le nom d'*optique* à la partie de la physique qui traite de la *lumière*.

365. *Hypothèses sur la nature de la lumière*. — La lumière est l'agent qui produit en nous le phénomène de la vision. Deux hypothèses ont été imaginées pour expliquer son origine : l'hypothèse de l'*émission* et celle des *ondulations*.

La première appartient à Newton ; elle admet que les corps lumineux lancent continuellement dans l'espace, avec une vitesse prodigieuse, une substance impondérable qui traverse les corps transparents et est arrêtée par les corps opaques. Cette

substance, arrivant au fond de notre œil, excite en nous une sensation particulière, en vertu de laquelle nous apercevons les corps lumineux qui l'envoient.

Dans la seconde hypothèse, imaginée par Descartes, on attribue la lumière à des vibrations très-rapides exécutées par les corps lumineux, vibrations qui se transmettraient jusqu'à l'organe de la vue, par l'intermédiaire d'un milieu élastique sous la forme d'ondulations analogues à celles qui transmettent le son. Ce milieu ne peut être l'air atmosphérique, puisque nous apercevons les astres à travers les espaces célestes. On le considère comme un fluide particulier, éminemment subtil, répandu partout, et que l'on désigne sous le nom d'*éther* (123). Ainsi, d'après cette hypothèse, la lumière prend naissance et se propage dans l'*éther*, comme le son prend naissance et se propage dans l'air et dans tous les autres corps élastiques. *L'hypothèse des ondulations* est admise aujourd'hui par la plupart des physiciens.

364. *Rayon et pinceau de lumière*. — On appelle *rayon lumineux* la ligne que suit la lumière en se propageant. La réunion de plusieurs rayons lumineux émanés d'une même source se nomme un *pinceau* ou un *faisceau* de lumière. Un pinceau ou un faisceau de lumière est dit *parallèle* lorsque les rayons qui le composent sont parallèles ; il est dit *divergent* ou *convergent*, selon que ses rayons vont en s'écartant ou en se rapprochant les uns des autres.

365. *Propagation de la lumière dans un milieu homogène*. — La propagation de la lumière dans un milieu homogène est soumise aux lois suivantes :

1<sup>re</sup> loi. — Dans un milieu homogène, la lumière se propage en ligne droite.

Il suffit, pour s'en assurer, d'interposer un corps opaque sur la droite menée de l'œil à un corps lumineux : celui-ci cesse à l'instant même d'être aperçu. Lorsqu'un pinceau de lumière pénètre dans une chambre obscure par une ouverture étroite, on voit encore une trace lumineuse parfaitement rectiligne éclairant la poussière et tous les corpuscules qui flottent dans l'air.

2<sup>e</sup> loi. — L'intensité de la lumière varie en raison inverse du carré de la distance.

Soit (fig. 233) un point lumineux L placé au sommet d'un cône droit dLc, coupé par un plan ob perpendiculaire à son axe

et à égale distance des points  $L$  et  $c$ . La distance  $Lc$  étant le double de la distance  $Lo$ , il en résulte que la surface du cercle  $cd$  est quatre fois plus grande que la surface du cercle  $ob$ . Or, ces deux cercles recevant, chacun, la totalité des rayons lumineux compris dans le cône, il est évident que chaque unité de surface du cercle  $cd$  sera quatre fois moins éclairée que l'unité de surface du cercle  $ob$ ; ce qui démontre le principe énoncé.

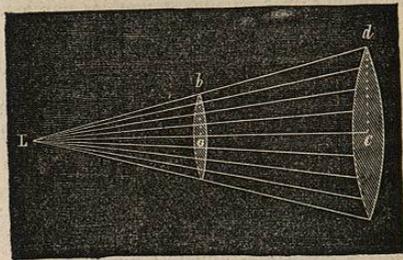


Fig. 233.

3<sup>e</sup> loi. — L'intensité de la lumière varie avec l'inclinaison de la surface qui l'émet ou qui la reçoit.

Si nous supposons (fig. 234) un faisceau de lumière émis obliquement par une surface  $AB$  dans la direction  $BS$ , l'intensité de ce faisceau sera la même que s'il provenait de la projection  $BC$  de cette surface sur un plan perpendiculaire à la ligne  $BS$ . On peut constater également qu'une surface est d'autant

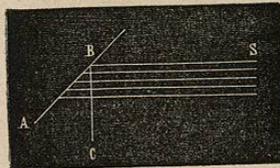


Fig. 234.

moins éclairée que son inclinaison par rapport à la direction des rayons incidents est plus grande. On démontre par le calcul que l'intensité de la lumière émise ou reçue par une surface oblique à la direction des rayons lumineux, est proportionnelle au sinus de l'angle que font ces mêmes rayons avec cette surface.

C'est en vertu de ce principe qu'une sphère lumineuse paraît plane lorsqu'on la regarde d'assez loin pour que ses rayons puissent être considérés comme sensiblement parallèles. Ainsi, la surface de la lune et celle du soleil, malgré leur convexité, nous apparaissent sous la forme de disques plans.

*Vitesse de la lumière.* — La lumière parcourt, dans le vide, environ 80030 lieues par seconde. Cette vitesse prodigieuse a été calculée pour la première fois en 1678 par Røemer, astro-

nome suédois, d'après l'observation des éclipses du premier satellite de la planète Jupiter. Dans ces derniers temps Foucault et M. Fizeau, au moyen d'appareils qui leur ont permis d'expérimenter à des distances de quelques kilomètres seulement, sont arrivés au même résultat. Le premier de ces deux observateurs a pu même reconnaître que la vitesse de la lumière est plus grande dans l'air que dans l'eau, ce qui est conforme aux déductions rationnelles de la théorie des ondulations.

La lumière franchit en 8<sup>m</sup>,43<sup>s</sup> la distance du soleil à la terre. On sait que les étoiles les plus rapprochées de la terre en sont au moins 200 000 fois plus éloignées que le soleil. Leur lumière emploie, par conséquent, plus de trois années pour arriver jusqu'à nous. Mais il y a d'autres étoiles dont la distance à la terre est telle, que la lumière qu'elles envoient doit mettre plusieurs milliers d'années pour parvenir jusqu'à notre système planétaire.

#### Ombre. Pénombre. — Mesure des intensités relatives de deux lumières.

566. *Ombre.* — On appelle ombre d'un corps la portion de l'espace où ce corps empêche la lumière d'arriver. Soient  $L$  (fig. 235) un point lumineux et  $m$  un corps opaque que nous

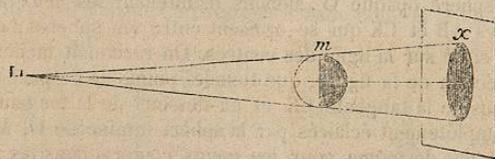


Fig. 235.

supposerons sphérique. Pour déterminer l'étendue et la forme de l'ombre projetée, il suffit de mener du point lumineux  $L$  une droite indéfinie  $Lx$  et de faire tourner cette droite autour du corps, en la forçant à s'appuyer constamment sur sa surface. On décrira de la sorte une surface conique dont le sommet sera le point lumineux et dont le prolongement au delà du corps opaque donnera la forme et l'étendue de l'ombre.

567. *Pénombre.* — Quand un corps opaque, au lieu d'être éclairé par un seul point, reçoit sa lumière d'un corps lumi-

neux de dimensions finies, on distingue autour de son ombre une portion de l'espace où la lumière n'arrive qu'en partie, et dans laquelle l'ombre semble, pour ainsi dire, se fondre et disparaître par degrés insensibles. La portion de l'espace où s'opère cette transition graduée de l'ombre à la lumière s'appelle la *pénombre*.

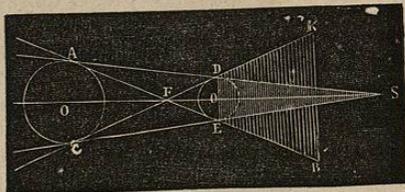


Fig. 236.

Supposons en effet (fig. 236) deux sphères O et O' dont la première soit lumineuse et la seconde opaque. Menons un plan par la ligne des centres OO', et tirons la tangente AS commune aux deux cercles d'intersection. Si nous faisons tourner cette ligne autour du point S, en l'appuyant toujours sur les surfaces des deux sphères, nous décrirons un cône ASC dont toute la partie DSE comprendra exactement l'ombre projetée par la sphère opaque O'. Menons maintenant les deux autres tangentes AB et CK qui se croisent entre les sphères, en un point F situé sur la ligne des centres. On reconnaît facilement, à l'inspection de la figure, que tous les points de l'espace situés au-dessus de la tangente CK et au-dessous de la tangente AB sont complètement éclairés par la sphère lumineuse O. Mais il n'en est pas de même pour les points compris dans les intervalles KDS et BES; ces points ne reçoivent qu'une partie de la lumière du corps éclairant, et il est facile de voir que cette partie est d'autant plus petite qu'ils sont situés plus près des limites de l'ombre absolue DSE. La lumière ira donc en s'affaiblissant graduellement depuis les lignes DK, EB, jusqu'aux lignes DS et ES, où elle s'éteindra complètement. L'espace compris entre ces lignes forme la *pénombre*.

*Remarque.* Lorsqu'un corps opaque, tel qu'un volet, par exemple, est percé d'une ouverture étroite, mais suffisante pour laisser passer facilement la lumière, l'ombre projetée par ce corps présente une tache brillante, dont la forme varie selon

la distance comprise entre l'écran qui reçoit l'ombre et l'orifice par lequel pénètre la lumière. Si l'écran est placé assez près de l'orifice, la tache brillante reproduit exactement la forme de ce dernier; mais si l'écran en est suffisamment éloigné, la tache brillante, *quelle que soit la forme de l'orifice*, donnera avec plus ou moins de netteté l'image renversée de l'objet lumineux. En effet, la lumière émise par chaque point de l'objet formant, dans ce dernier cas, un faisceau divergent qui se moule exactement sur les bords de l'orifice par lequel il pénètre, l'ensemble de tous ces faisceaux ne peut donner autre chose qu'une image de l'objet lui-même, laquelle sera renversée et d'autant plus nette que l'orifice sera plus étroit. C'est ce qui explique la forme arrondie que présentent les taches brillantes dont est parsemée l'ombre des arbres. Chaque interstice du feuillage, quelle que soit sa configuration, produit sur le sol une image du soleil, image exactement ronde quand le sol est perpendiculaire à la direction du soleil, mais qui devient ovale quand le sol, ce qui a lieu le plus fréquemment, se présente sous une incidence oblique. Pendant une éclipse solaire, ces taches ne pouvant représenter que la partie de l'astre non éclipsée, prennent la forme d'un croissant.

568. *Mesure des intensités relatives de deux lumières.* — La mesure des intensités relatives de deux lumières s'obtient au moyen d'appareils que l'on désigne sous le nom de *photomètres*.

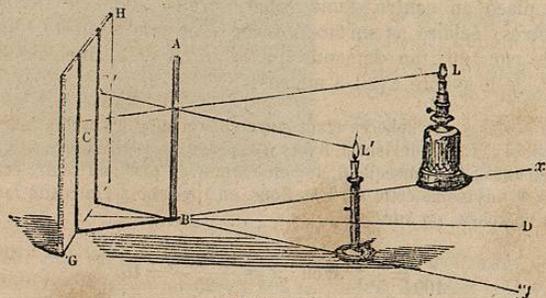


Fig. 237.

Le photomètre le plus simple est celui de Rumford. Pour construire cet appareil, on commence (fig. 237) par tracer sur un plancher une longue ligne droite BD et deux autres lignes Bx, By, formant avec la première deux angles DBx et DBy, égaux.

Au point de jonction des trois lignes on fixe verticalement une tige opaque AB en bois ou en métal, derrière laquelle on place, à une petite distance, un écran translucide GH, dans une direction perpendiculaire à la ligne du milieu BD. On dispose ensuite les deux lumières L et L' dont on veut mesurer les intensités relatives, l'une sur la droite Bx et l'autre sur la droite By à la même hauteur. La tige verticale AB projette alors sur l'écran deux ombres C et C', dont chacune est éclairée par l'une des deux lumières, savoir : l'ombre C par la lumière L' et l'ombre C' par la lumière L.

En se plaçant à une certaine distance derrière l'écran, sur le prolongement de la ligne BD, on peut apprécier d'une manière très-exacte les intensités de chaque ombre. Si l'on fait alors varier la distance de l'une des lumières jusqu'à ce que les deux ombres aient la même teinte, ce qui a lieu lorsqu'elles sont également éclairées, il suffira, pour connaître les intensités relatives des deux lumières, de mesurer leurs distances aux ombres projetées. Par exemple, si la lumière de la lampe L est deux fois plus éloignée que celle de la bougie L', on conclura que son intensité est quatre fois plus grande; si elle était à une distance triple, son intensité serait neuf fois plus considérable; à une distance quadruple, seize fois, etc., en vertu de la loi précédemment indiquée (365, 2<sup>e</sup> loi).

*Problèmes sur l'intensité de la lumière.* — 1. Un point lumineux placé au centre d'une sphère creuse, dont le rayon a 2 mètres, éclaire sa surface interne avec une intensité représentée par 400 : on demande quelle serait cette intensité si le rayon de la sphère avait 5 mètres.

Les surfaces des sphères étant entre elles comme les carrés de leurs rayons, si le rayon devient 2, 3 fois plus grand, la surface sera 4, 9 fois plus étendue; par conséquent, le point lumineux placé au centre éclairera 4, 9 fois moins cette surface. Donc, en appelant  $x$  l'intensité lumineuse cherchée, on aura

$$\frac{x}{400} = \frac{2^2}{5^2}; \text{ d'où } x = \frac{400 \times 4}{25} = 16.$$

2. La flamme d'un bec de gaz et celle d'une bougie sont placées à une distance de 40 mètres l'une de l'autre : on demande en quel point il faudrait placer un écran entre ces deux lumières, pour qu'il fût également éclairé par chacune d'elles,

en supposant que l'intensité de la lumière de la flamme du gaz soit 16 fois plus grande que celle de la bougie.

L'intensité de la lumière décroissant comme le carré de la distance augmente, si nous appelons  $x$  la distance de la flamme du gaz au point demandé, celle de la bougie étant alors  $40 - x$ , nous aurons l'équation

$$\frac{16}{x^2} = \frac{1}{(40 - x)^2} \text{ ou } \frac{4}{x} = \frac{1}{40 - x};$$

d'où  $x = 32^m$ .

C'est-à-dire qu'il faudra placer l'écran à 32 mètres de la flamme du gaz et à 8 mètres de celle de la bougie.

### Réflexion de la lumière. — Lois de la réflexion.

369. *Réflexion de la lumière.* — On appelle *réflexion* de la lumière le changement de direction qu'éprouve un rayon lumineux lorsqu'il tombe sur la surface polie d'un miroir de glace ou de métal.

Soient AB (fig. 238) la surface d'un miroir plan, CR un rayon lumineux qui tombe sur cette surface au point R, et RC' ce même rayon réfléchi. Si nous élevons au point d'incidence R une perpendiculaire ou *normale* RD à la surface réfléchissante, l'angle CRD, formé par le rayon incident avec la normale, est l'*angle d'incidence*, et l'angle DRC', formé par la normale avec le rayon réfléchi, est l'*angle de réflexion*.

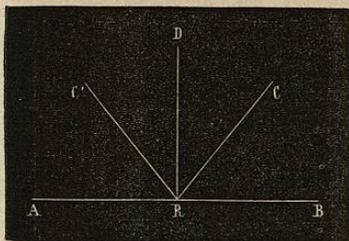


Fig. 238.

370. *Lois de la réflexion de la lumière.* — La réflexion de la lumière est soumise aux deux lois suivantes, qui sont les mêmes que pour la chaleur rayonnante :

1<sup>re</sup> loi. — L'*angle de réflexion* est égal à l'*angle d'incidence*.

2<sup>e</sup> loi. — Le *rayon incident* et le *rayon réfléchi* sont dans un même plan perpendiculaire à la surface réfléchissante.

Physique.

de ces perpendiculaires prolongées déterminent la grandeur et la position de l'image. La *fig. 241* montre la construction qu'il faut faire pour obtenir l'image  $A'B'$  de l'objet  $AB$  placé au-devant d'un miroir plan  $MN$ . On voit que cette image présente exactement la forme et la dimension de l'objet. Elle n'est donc pas, comme on le dit quelquefois, renversée; mais elle est *symétrique*, dans le sens que l'on attache à ce mot en géométrie.

**373. Réflexions sur deux miroirs plans parallèles.** — Lorsqu'un point ou un objet lumineux se trouve placé entre deux miroirs plans parallèles, il donne naissance à une infinité d'images qui toutes sont situées sur une même ligne perpendiculaire aux deux surfaces réfléchissantes. Ce phénomène est facile à comprendre.

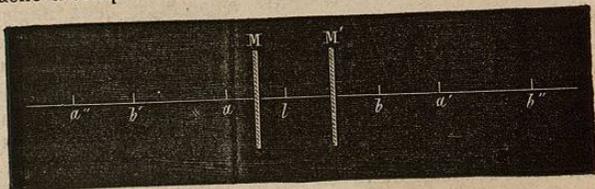


Fig. 242.

Soit (*fig. 242*) un objet lumineux  $l$  placé entre deux miroirs parallèles  $M$  et  $M'$ . Les rayons qui tombent directement sur le miroir  $M$  forment une image en  $a$ , et ceux qui tombent directement sur  $M'$  donnent leur image en  $b$ . Mais ces derniers rayons, après leur réflexion sur le miroir  $M'$ , vont tomber sur le miroir  $M$  comme s'ils partaient de l'image  $b$ ; ils forment, par conséquent, une nouvelle image en  $b'$  symétrique de  $b$ , laquelle se reproduit à son tour en  $b''$ , sur le miroir  $M'$ . Pareillement les premiers rayons réfléchis par le miroir  $M$  arrivent sur le miroir  $M'$  comme s'ils partaient de l'image  $a$ ; ils donnent donc aussi une autre image en  $a'$  symétrique de  $a$ . Mais les rayons qui viennent de former cette image  $a'$  reviennent sur le miroir  $M$ , où ils forment l'image  $a''$ , laquelle, à son tour, se reproduit dans le miroir  $M'$ , et ainsi de suite. On aura donc une série indéfinie d'images dont l'intensité s'affaiblira de plus en plus à mesure qu'elles s'éloigneront.

**374. Réflexion sur deux miroirs plans inclinés.** — Les mêmes phénomènes se reproduisent encore entre deux miroirs inclinés,

mais avec cette différence que le nombre des images, au lieu d'être indéfini, est limité, et qu'il varie avec l'angle des miroirs. Il suffira d'examiner le cas où les deux miroirs font ensemble un angle droit.

Soient (*fig. 243*) les deux miroirs plans  $M$  et  $N$  perpendiculaires l'un à l'autre, et un point lumineux  $a$  placé entre eux à une distance quelconque de l'un ou de l'autre. Les rayons qui tombent directement sur le miroir  $M$  donnent l'image  $a'$ , et ceux qui tombent sur le miroir  $N$  forment l'image  $a''$ . Mais les rayons qui ont subi une première réflexion sur  $N$  retombent sur  $M$ , comme s'ils venaient du point  $a''$ ; ils forment, par conséquent, une troisième image  $a'''$  symétrique de  $a''$  par rapport au miroir  $M$ . Pareillement, les rayons qui ont subi une première réflexion sur  $M$  et qui retombent sur  $N$  donnent encore une image au point  $a''''$ , puisque ce point est aussi symétrique du point  $a'$ , par rapport au miroir  $N$ . On aura donc en tout trois images réfléchies,  $a'$ ,  $a''$ ,  $a'''$ .

Il est facile de voir que ces trois images et le point lumineux lui-même sont situés sur une circonférence ayant pour rayon la perpendiculaire menée du point lumineux  $a$  à l'intersection des deux miroirs.

On démontrerait de la même manière que si l'angle des miroirs était de  $72^\circ$ , il se formerait quatre images réfléchies; que s'il était de  $60^\circ$ , il s'en formerait cinq; de  $45^\circ$ , sept, etc., le nombre des images croissant à mesure que l'angle des miroirs diminue.

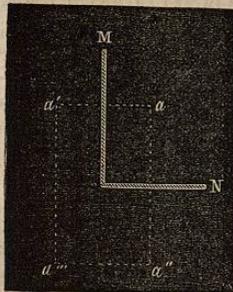


Fig. 243.

C'est sur ce principe que repose la construction d'un petit instrument de curiosité bien connu nommé *kaléidoscope*. Il se compose d'un tube de carton dans lequel sont deux miroirs plans formant entre eux un angle de  $60^\circ$ . À l'une des extrémités du tube on place, entre deux lames de verre, des objets irréguliers, tels que des petits morceaux de verre coloré, du clinquant, de la dentelle, etc. Lorsqu'on regarde par l'autre extrémité, on voit ces divers objets, avec leurs cinq images groupées symétriquement, former une rosace hexagonale, dont on peut faire varier indéfiniment le dessin en tournant le tube sur lui-même.

575. *Miroirs métalliques et miroirs de verre.* — Les miroirs métalliques et les miroirs de verre présentent entre eux une différence assez importante à noter. Les premiers, n'ayant qu'une seule surface de réflexion, ne forment qu'une seule image, tandis que les miroirs de verre ayant deux surfaces réfléchissantes (celle du verre et celle du tain) donnent naissance à plusieurs images que l'on peut observer assez facilement en regardant obliquement dans une glace la flamme d'une bougie. Ces images multiples sont le résultat de réflexions successives qui se font d'une surface à l'autre à travers l'épaisseur de la glace, comme entre deux miroirs parallèles.

576. *Images virtuelles et images réelles.* — On appelle image virtuelle celle qui tend à se produire lorsque les rayons, après leur réflexion sur le miroir, sont divergents. Dans ce cas, en effet, l'image n'est qu'une illusion de l'œil qui croit voir l'objet au lieu où se rencontreraient les rayons prolongés derrière le miroir, comme le montrent les fig. 240 et 241. L'image réelle, au contraire, se forme lorsque les rayons, après leur réflexion, sont convergents. On l'appelle ainsi parce qu'elle existe réellement au point où les rayons se rencontrent au-devant du miroir, et qu'elle peut être reçue sur un écran. Les miroirs plans ne donnent jamais que des images virtuelles.

#### Miroirs sphériques.

577. *Miroirs sphériques.* — Supposons (fig. 244) que l'on fasse tourner sur lui-même un arc de cercle MN autour du rayon CO qui joint le milieu de l'arc à son centre; on engendrera une

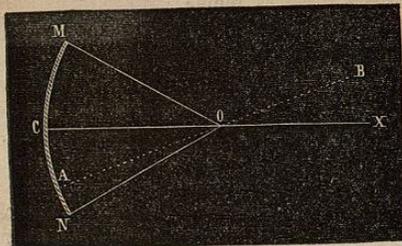


Fig. 244.

calotte sphérique. Si cette calotte, que nous supposerons en métal, est polie intérieurement, elle formera un miroir *concave*; au contraire, si c'est sa surface extérieure qui est brillante, ce sera un miroir *convexe*.

Le point C, situé à égale distance de tous les points de la circonférence qui forme le bord du miroir, est le centre de figure ou *sommet* du miroir; le point O, qui est le centre de la sphère à laquelle appartient le miroir, est le *centre de courbure* ou *centre géométrique*. La ligne droite indéfinie CX, menée par ces deux points C et O, est l'*axe principal* du miroir. Toute autre droite AB, passant par le centre de courbure O et par un point quelconque du miroir, est un *axe secondaire*. L'angle MON, que l'on obtient en joignant deux points diamétralement opposés du bord du miroir au centre de courbure, forme ce que l'on nomme l'*ouverture* du miroir.

Dans tout ce qui va suivre, nous supposerons que l'ouverture du miroir est très-petite, ou, en d'autres termes, que le miroir, quelle que soit son étendue superficielle, n'est qu'une faible portion de la surface entière de la sphère à laquelle il appartient.

578. *Réflexion de la lumière sur les miroirs sphériques.* — La réflexion de la lumière sur une surface courbe se fait suivant les mêmes lois que sur une surface plane.

Soit en effet (fig. 245) un rayon lumineux LR tombant sur une surface courbe quelconque MN. Si nous concevons un plan tangent AB, passant par le point d'incidence R, il est évident que le rayon se réfléchira sur la surface courbe, comme il le ferait au même point sur le plan AB. Si la surface courbe MN est sphérique, le prolongement RK du rayon de courbure CR sera perpendiculaire au plan tangent AB. Le rayon lumineux se réfléchira donc suivant RL', en faisant avec la normale KR l'angle de réflexion KRL' égal à l'angle d'incidence KRL. Donc, *tout rayon lumineux qui rencontre une surface courbe se réfléchit comme il le ferait sur le plan tangent mené au point d'incidence.*

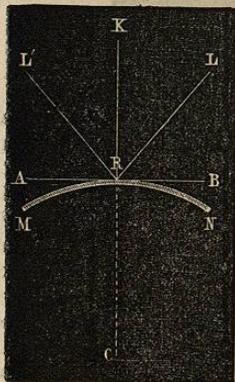


Fig. 245.

## Miroirs sphériques concaves.

379. *Effets des miroirs sphériques concaves.* — Les miroirs sphériques concaves peuvent donner naissance aux deux sortes d'images, *réelles et virtuelles*, que nous avons précédemment indiquées. Mais avant d'exposer la théorie de ces images, nous devons nous occuper de la détermination des *foyers*, c'est-à-dire des points où les rayons lumineux, après leur réflexion, vont s'entre-croiser directement ou par leurs prolongements. On distingue dans les miroirs sphériques concaves trois sortes de foyers : 1<sup>o</sup> le *foyer principal*, 2<sup>o</sup> les *foyers conjugués*; 3<sup>o</sup> les *foyers virtuels*.

1<sup>o</sup> *Foyer principal.* — Le *foyer principal* d'un miroir concave est le point où tous les rayons incidents, parallèles à l'axe principal et tombant sur le miroir à une petite distance angulaire de son sommet, viennent concourir après leur réflexion. Ce point est placé sur l'axe principal à une distance sensiblement égale du sommet du miroir et du centre de courbure.

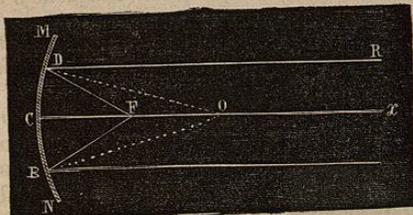


Fig. 246.

Soit en effet (fig. 246) un rayon lumineux RD parallèle à l'axe principal Cx, et très-voisin de cet axe. Soient OD la normale au point d'incidence sur le miroir MN, et DF le rayon réfléchi faisant l'angle  $FDO = ODR$ . Le point d'intersection F du rayon réfléchi avec l'axe Cx sera le *foyer principal* du miroir. Or, il est facile de démontrer que ce point est sensiblement au milieu du rayon de courbure CO. En effet, les deux angles FDO et FOD sont égaux entre eux, comme étant tous deux égaux à l'angle d'incidence RDO, le premier comme angle de réflexion et le second comme alterne-interne. Donc le triangle DFO est isocèle et  $DF = FO$ . Mais l'arc CD étant supposé très-petit, la ligne FC ne diffère pas sensiblement de la ligne FD; et, par conséquent, le foyer F est au milieu de CO ou du moins s'en rapproche d'autant plus que

le rayon lumineux RD est plus voisin de l'axe principal Cx. Il en sera de même pour tout autre rayon lumineux parallèle à l'axe principal, pourvu que l'ouverture du miroir ne dépasse pas 8 à 10 degrés. La distance CF se nomme *distance focale principale*: nous venons de voir qu'elle est sensiblement égale à la moitié du rayon de courbure CO.

Réciproquement, si l'on place un point lumineux au foyer principal d'un miroir concave, tous les rayons émis par ce point se réfléchiront parallèlement à l'axe.

2<sup>o</sup> *Foyers conjugués.* — Supposons un point lumineux L (fig. 247) placé sur l'axe principal d'un miroir concave, au delà du centre de courbure O, et envoyant sur ce miroir un faisceau de rayons divergents.

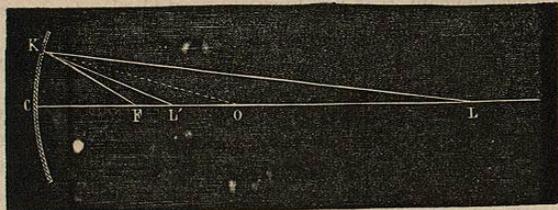


Fig. 247.

Soient LK un de ces rayons incidents et KL' le rayon réfléchi, venant couper l'axe principal en L', et faisant avec la normale OK l'angle de réflexion L'KO égal à l'angle d'incidence LKO. On voit que cet angle de réflexion L'KO est plus petit que l'angle FKO formé par la normale avec la ligne menée du point d'incidence au foyer principal. Le point d'intersection L' sera, par conséquent, situé entre le foyer principal F et le centre de courbure O. Tout autre rayon émis par le point L viendra de même couper l'axe principal en L', pourvu que l'ouverture du miroir ne soit pas trop grande. Or, c'est ce point L' que l'on appelle le *foyer conjugué* du point lumineux L, pour indiquer que ces deux points sont réciproquement liés l'un à l'autre, de telle sorte que si on transportait le point lumineux en L', son foyer conjugué se ferait en L.

Il est facile de voir que si le foyer lumineux L s'approche ou s'éloigne du centre O, son foyer conjugué s'en approche ou s'en éloigne aussi, puisque les angles d'incidence et de réflexion diminuent ou augmentent en même temps.

Toutefois, quelle que soit la position du point lumineux L sur l'axe principal, la distance L'O sera toujours plus petite que la distance L'O. En effet, l'angle de réflexion L'KO étant égal à l'angle d'incidence LKO, la normale OK est la bissectrice de l'angle au sommet du triangle L'KL. On aura par conséquent

$$\frac{L'O}{L'O} = \frac{L'K}{LK}$$

Mais le côté L'K du triangle L'KL étant plus petit que le côté LK opposé au plus grand angle du triangle, il en résultera que L'O sera aussi plus petit que LO. Donc, le foyer conjugué L' d'un point lumineux L situé au delà du centre de courbure d'un miroir concave, sera toujours plus rapproché de ce centre que le point lumineux.

Réciproquement, si le point lumineux est placé entre le centre de courbure et le foyer principal, son foyer conjugué se fait au delà du centre, à une distance d'autant plus grande que ce point est plus rapproché du foyer.

Enfin si le point lumineux était au centre du miroir, son foyer se confondrait avec lui, car, dans ce cas, l'angle d'incidence étant nul, les rayons, en se réfléchissant, reviendraient directement sur eux-mêmes.

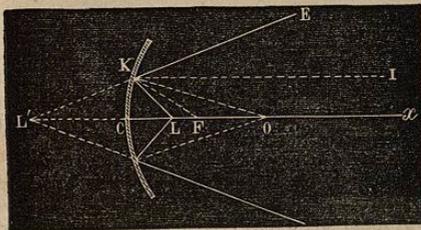


Fig. 248.

3° Foyers virtuels. — Supposons maintenant le point lumineux L (fig. 248) placé plus près encore du miroir, entre le foyer principal F et le sommet C du miroir. L'angle d'incidence LKO, formé par le rayon incident LK et la normale KO, étant plus grand que l'angle FKO, l'angle de réflexion OKE sera aussi plus grand que l'angle OKI, formé par la normale et par la droite IK parallèle à l'axe. Le rayon réfléchi KE sera donc divergent par rapport à l'axe principal Cx, et il en sera de même de tout

autre rayon émis par le point L. Donc ces rayons ne pourront pas rencontrer directement l'axe pour former un foyer conjugué. Mais si nous les supposons prolongés derrière le miroir, nous voyons que leurs prolongements vont couper l'axe en un même point L' situé au delà du miroir; on donne à ce point le nom de foyer virtuel. En supposant l'œil placé en E, c'est-à-dire dans la direction des rayons réfléchis, il percevra ces divers rayons comme s'ils émanaient du point L', où il verra l'image du point lumineux L. Il est facile de voir que le foyer virtuel sera d'autant plus voisin du miroir que le point lumineux en sera lui-même plus rapproché.

Remarque. Dans tout ce qui précède, nous avons supposé le point lumineux placé sur l'axe principal. Mais lorsque ce point est situé en dehors, son foyer ne se forme plus sur cet axe. Il se produit alors, en vertu des mêmes principes, sur la droite qui joint le point lumineux à la surface du miroir, en passant par le centre de courbure, c'est-à-dire sur l'axe secondaire de ce point (377).

580. Formation des images dans les miroirs concaves. — Les miroirs concaves donnent naissance, avons-nous dit, à des images réelles et à des images virtuelles. La formation de ces images se déduit facilement des considérations qui précèdent.

1° Images réelles. — Ces images se produisent lorsque l'objet est situé au delà du centre de courbure du miroir ou entre ce centre et le foyer principal.

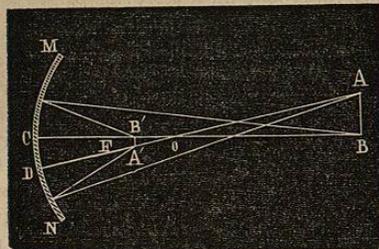


Fig. 249.

Soit (fig. 249) un objet lumineux ou simplement éclairé AB, placé au delà du centre et à une certaine distance du miroir MN. Le point B, étant situé sur l'axe principal aura son foyer conjugué en B' sur ce même axe, entre le foyer principal F et le centre

de courbure O; de sorte qu'un observateur convenablement placé verra l'image réelle du point B en B'. Si nous tirons maintenant l'axe secondaire AD du point A, nous aurons également en A' le foyer conjugué ou l'image réelle de ce point; et comme tous les points compris entre A et B formeront leur image entre B' et A', il en résultera que l'image totale B'A' de l'objet AB sera *renversée et plus petite que l'objet*. En effet, A'B' et AB étant les bases des triangles semblables A'OB' et AOB, on a

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

et comme le point B' est toujours plus rapproché du centre O que le point B (379), il en résulte que l'image A'B' sera toujours plus petite que l'objet AB.

Si l'on suppose que l'objet AB se rapproche du centre, il est facile de voir, en construisant la figure, que l'image A'B' s'en rapproche immédiatement et que sa grandeur augmente. Enfin, la dimension de l'image, toujours réelle et renversée, devient égale à celle de l'objet, quand celui-ci est placé au niveau du centre de courbure, dans un plan perpendiculaire à l'axe principal.

Réciproquement, si l'objet est placé en B'A', c'est-à-dire *entre le foyer principal et le centre de courbure*, son image se fait en AB au delà du centre; elle est encore *renversée*, mais *plus grande*. Elle est d'autant plus grande et plus éloignée que l'objet est plus rapproché du foyer principal du miroir.

Quand l'objet lumineux est situé sur l'axe principal à une distance assez grande pour que tous les rayons qu'il envoie puissent être regardés comme parallèles, cet objet forme au *foyer principal* du miroir une image très-petite et renversée. C'est ce que l'on peut facilement constater en exposant aux rayons du soleil un miroir concave. L'observateur placé sur le trajet des rayons réfléchis, au delà de leur point d'entrecroisement, verra au foyer principal une petite image du soleil excessivement brillante. La construction géométrique de la figure montre que cette image est renversée et que, sans jamais atteindre la dimension apparente de l'astre, elle sera néanmoins d'autant plus grande que le rayon de courbure du miroir sera plus long.

Cette expérience peut servir à déterminer le rayon de courbure d'un miroir concave. Il suffit, en effet, de mesurer au moyen d'une règle divisée la distance de l'image au sommet du

miroir : le double de la distance focale ainsi trouvée est le rayon du miroir (379).

*Remarque.* — Dans les expériences qui précèdent, l'image et l'objet sont toujours compris entre deux droites telles que AA' BB' (fig. 248) qui se croisent au centre de courbure du miroir, où elles forment deux angles égaux opposés par leur sommet; c'est ce qu'on exprime en disant que l'image, vue du centre de courbure, *sous-tend le même angle que l'objet*. Toutes ces images étant réelles peuvent être reçues sur un écran. Mais on peut les voir immédiatement en se plaçant dans la direction des rayons réfléchis; elles forment alors des images aériennes dont tous les points semblent émettre eux-mêmes de la lumière.

2° *Images virtuelles.* — Ces images se produisent lorsque l'objet est situé *entre le miroir concave et son foyer principal*.

Soit, en effet, un objet AB (fig. 250) placé entre le miroir MN et son foyer principal F. Le point B forme son foyer virtuel en B', sur le prolongement de l'axe principal B'O; le point A forme de même son foyer virtuel en A' sur le prolongement de l'axe secondaire A'O. Ces deux foyers sont situés aux points où les rayons lumineux BK, AL, partis de B et de A, et prolongés après leur réflexion, vont rencontrer leurs axes derrière le miroir. Tous les points intermédiaires entre A et B font également leur image entre A' et B', de sorte que l'image totale est *virtuelle, droite et plus grande que l'objet*.

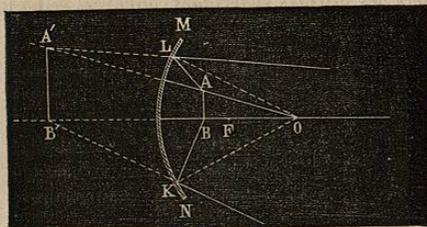


Fig. 250.

*Remarque.* Lorsque l'objet est placé au foyer principal d'un miroir concave, il ne donne aucune image réelle ou virtuelle. Les rayons émis par chaque point de l'objet formant alors, après leur réflexion, des faisceaux de lumière parallèles à leurs axes, ne peuvent, en effet, se concentrer en un foyer, soit directement, soit par leur prolongement en arrière du miroir.