

1° Le centre de courbure du miroir étant connu, soit L le point lumineux ou éclairé dont on cherche le foyer conjugué (fig. 305). Menons d'abord l'axe secondaire LCI , et remarquons, une fois pour

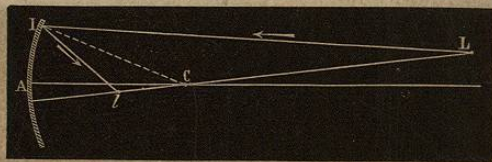


Fig. 305.

toutes, que tout axe secondaire, de même que l'axe principal, représente toujours un rayon lumineux incident, mais un rayon qui se confond avec la normale, et, par conséquent, avec le rayon réfléchi. Cela posé, si l'on tire du point L un rayon incident quelconque LI , et qu'on mène au point d'incidence la normale CI , l'angle CIL est l'angle d'incidence correspondant au rayon LI . Si donc on fait de l'autre côté de la normale l'angle CII égal à CIL , Ii est le rayon réfléchi, et le point i , où il coupe l'axe secondaire, est le foyer conjugué du point L; car on démontrerait de la même manière qu'on l'a déjà vu pour l'axe principal (450, 2°), que tous

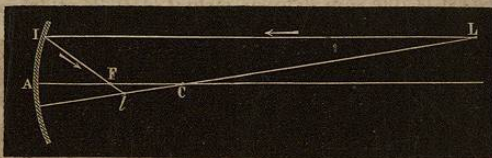


Fig. 306.

les rayons partis du point L vont très-approximativement concourir en i .

2° Au lieu de mener du point L un rayon incident quelconque, si l'on tire un rayon LI parallèle à l'axe principal (fig. 306), on sait (450, 1°) que le rayon réfléchi devra passer par le foyer principal F. Donc la direction de ce rayon est immédiatement déterminée, et par suite le foyer i . Réciproquement, si le point lumineux L était entre le foyer principal et le centre (fig. 307), la même construction ferait trouver le foyer i . En effet, menant d'abord l'axe secondaire CD , puis le rayon LI parallèle à l'axe principal, le rayon réfléchi passe par le foyer principal F, et son prolongement va couper l'axe secondaire en un point i qui est le foyer conjugué cherché.

Ce second mode de construction, qui consiste à prendre un rayon incident parallèle à l'axe principal, au lieu d'un rayon quelconque, est plus simple; mais il est moins général, car il ne traite

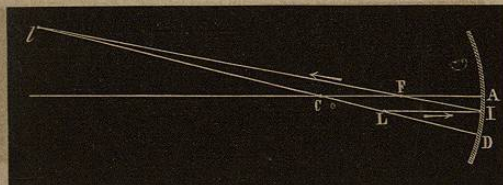


Fig. 307.

qu'un cas particulier. Si du point L on faisait partir plusieurs rayons incidents, il faudrait forcément avoir recours à la construction de la figure 305. Il en est encore de même dans plusieurs cas de la construction des images dans les instruments d'optique qui seront donnés plus tard.

Foyer virtuel. — Les deux modes de construction qui précèdent s'appliquent également au foyer virtuel, comme le montrent les figures 308 et 309. Dans la première, ayant mené l'axe secondaire LC , qu'on a soin de prolonger de l'autre côté du miroir, parce qu'on sait que c'est là que sera le foyer virtuel (450, 3° et 4°), on tire un

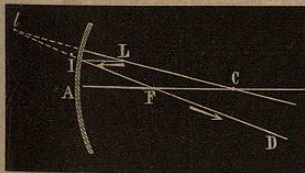


Fig. 309.

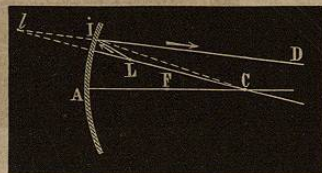


Fig. 308.

rayon incident quelconque LI , puis la normale IC ; faisant ensuite l'angle de réflexion CID égal à CIL , le prolongement de ID va couper l'axe secondaire en un point i , qui est le foyer virtuel de L.

Dans la deuxième construction (fig. 309), le rayon incident LI étant parallèle à l'axe principal, le rayon réfléchi passe par le foyer principal F, et FI prolongé derrière le miroir donne le même foyer virtuel i que ci-dessus.

452. Construction des images réelles dans les miroirs concaves.

— Jusqu'ici on a supposé que l'objet lumineux ou éclairé, placé devant les miroirs, était simplement un point; mais si cet objet a une certaine étendue, on peut concevoir par chacun de ses points

un axe secondaire, et déterminer ainsi une suite de foyers réels ou virtuels dont l'ensemble composera l'image réelle ou virtuelle de l'objet. C'est la position et la grandeur de ces images que nous allons apprendre à déterminer dans les miroirs concaves d'abord, en nous fondant sur les constructions qui viennent d'être données pour les foyers réels et virtuels (451).

Soit d'abord le cas où l'objet AB, dont on cherche l'image, est placé au delà du centre (fig. 310). La construction de cette image revient à celle des foyers conjugués des différents points de l'objet AB. Mais on se borne à déterminer les foyers des points extrêmes A et B. Pour cela, on tire d'abord les axes secondaires AE et BI de ces points; puis, menant un rayon incident quelconque AD

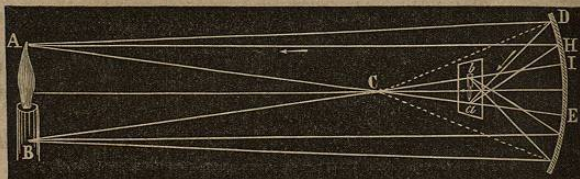


Fig. 310.

non parallèle à l'axe principal, comme on l'a déjà vu ci-dessus (fig. 305), on tire la normale CD du point d'incidence. Faisant enfin l'angle de réflexion CDa égal à l'angle d'incidence ADC , le point a , où le rayon réfléchi va couper l'axe secondaire AE, est le foyer conjugué du point A, ou, ce qui est la même chose, son image; car tout autre rayon AH, émis du point A, vient de même, après la réflexion, passer en a . La même construction appliquée au point B fait voir que tous les rayons incidents émis de ce point vont, après la réflexion, concourir en b , et y former l'image de B. On a donc en ab l'image de AB.

Si, au lieu de considérer un rayon incident quelconque, on fait usage de la construction donnée dans la figure 306, c'est-à-dire si l'on prend les rayons incidents parallèles à l'axe principal, l'image se détermine alors comme le montre la figure 311. Les rayons parallèles AD et BG vont, après s'être réfléchis, passer tous les deux par le foyer principal F, et en coupant les axes secondaires des points A et B, en a et en b , ils donnent la même image ab que dans la figure 310.

Quelle que soit celle de ces deux constructions qu'on applique, l'image ab est réelle, renversée, placée entre le centre de courbure et le foyer principal, et d'autant plus petite, que l'objet est plus éloigné.

On peut voir cette image de deux manières : en plaçant l'œil sur le prolongement des rayons réfléchis, et c'est alors une image aérienne qu'on aperçoit; ou bien on reçoit les rayons sur un

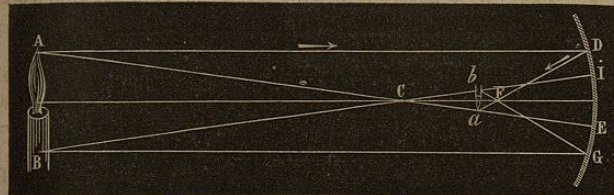


Fig. 311.

écran qui réfléchit la lumière dans toutes les directions et la renvoie vers l'œil.

Réciproquement, si l'objet lumineux ou éclairé, dont on cherche l'image, est placé en ab (fig. 310 et 311), entre le foyer principal et le centre, son image se forme en AB. Elle est encore réelle et renversée, mais plus grande que l'objet, et d'autant plus grande, que l'objet ab est plus près du foyer.

Si l'objet est placé au foyer principal même, il ne se produit aucune image; car alors les rayons émis de chaque point forment, après la réflexion, autant de faisceaux respectivement parallèles à

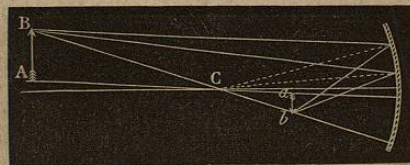


Fig. 312.

l'axe secondaire mené par le point d'où ils sont émis (450), et par suite ils ne peuvent former ni foyers, ni images.

Enfin, si l'objet AB a tous ses points hors de l'axe principal (fig. 312), on trouve facilement, en répétant une des deux constructions qui précèdent, que l'image se produit en ab , de l'autre côté de l'axe.

453. **Construction des images virtuelles dans les miroirs concaves.** — On a vu qu'il n'y a foyer virtuel dans les miroirs concaves qu'autant que les rayons partent d'un point situé entre le foyer principal et le miroir (450, 3^o); c'est donc dans cette position que doit être l'objet dont on cherche l'image virtuelle. Cela posé, les deux constructions qui ont été données ci-dessus pour trou-

ver les images réelles, s'appliquent exactement aux images virtuelles.

1° L'objet AB (fig. 213) étant placé entre le miroir et le foyer, soient menés les axes secondaires CAa et CBb , puis un rayon inci-

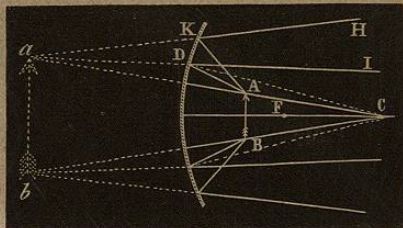


Fig. 313.

dent quelconque AD , et enfin la normale CD . Construisant l'angle CDI égal à CDA , on a le rayon réfléchi DI , qui est divergent par rapport à l'axe secondaire Ca . De même, un autre rayon incident AK donnant le rayon réfléchi KH , le faisceau réfléchi $IDKH$ est divergent, et l'œil le reçoit comme s'il était émis du point a . C'est donc en a que l'on voit l'image virtuelle de A . L'image de B se formant de la même manière en b , on a en ab l'image de AB .

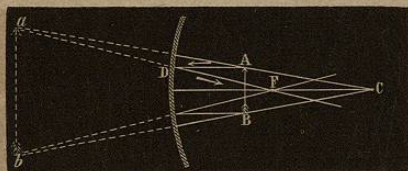


Fig. 314.

Cette image est virtuelle, redressée, plus grande que l'objet, et située derrière le miroir.

2° Ou bien, considérant un rayon AD parallèle à l'axe principal (fig. 314), ce rayon, après s'être réfléchi sur le miroir, va passer par le foyer principal F , et son prolongement va couper l'axe secondaire mené par le point A en un point a , qui est le foyer virtuel de A . Celui de B se formant de la même manière en b , on a en ab la même image virtuelle que ci-dessus.

454. **Miroirs convexes, leurs foyers.** — Dans les miroirs convexes, il n'y a que des foyers virtuels. Soient, en effet, des rayons SI, TK, \dots (fig. 315), parallèles à l'axe principal d'un miroir con-

vexe. Ces rayons, après leur réflexion, prennent des directions divergentes IM, KH, \dots , qui, prolongées, vont concourir en un point F , qui est le *foyer virtuel principal* du miroir. Au moyen du triangle CKF , on démontrerait, de la même manière que dans les

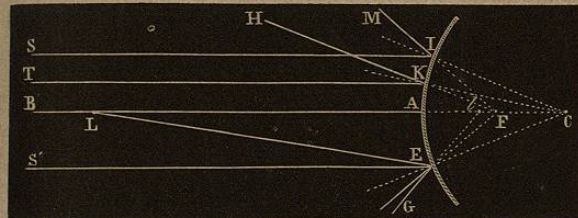


Fig. 315.

miroirs concaves, que le point F est le milieu du rayon de courbure CA .

Si les rayons lumineux incidents, au lieu d'être parallèles à l'axe, partent d'un point L situé sur l'axe à une distance finie, on reconnaît facilement que le foyer est encore virtuel, mais vient se faire en l , entre le foyer principal F et le miroir.

455. **Détermination du foyer principal dans les miroirs convexes.** — Pour trouver expérimentalement le foyer virtuel prin-

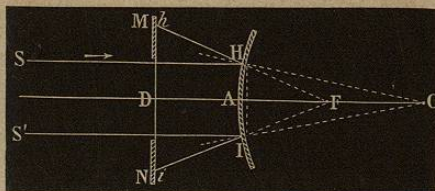


Fig. 316.

cipal d'un miroir convexe, on le recouvre de papier, en ayant soin de réserver dans celui-ci, à égale distance du centre de figure A , et dans un même plan méridien (fig. 316), deux petites ouvertures circulaires en H et en I , qui laissent le miroir à nu. On place ensuite, devant le miroir, un écran MN , percé à son centre d'une ouverture circulaire plus grande que la distance HI . Si l'on reçoit alors, sur le miroir, un faisceau de rayons solaires SH, SI , parallèles à l'axe, la lumière se réfléchit en H et en I , sur les parties où le miroir est à découvert, et va former, sur l'écran, deux images brillantes en h et en i . En reculant l'écran MN , ou en l'ap-

prochant, on trouve une position où l'intervalle hi est double de HI . La distance AD de l'écran au miroir représente alors la distance focale principale. En effet, l'arc HAI se confondant sensiblement avec sa corde, et les triangles FHI et Fhi étant semblables, on a $\frac{HI}{hi} = \frac{FA}{FD}$; mais HI est la moitié de hi , donc FA égale aussi la moitié de FD . Par conséquent, AD égale AF ; d'ailleurs, FA est la distance focale principale, puisque les rayons SH et $S'I$ sont parallèles à l'axe; le double de AD représente donc le rayon de courbure du miroir.

456. **Formation des images dans les miroirs convexes.** — Soit un objet AB (fig. 317) placé devant un miroir convexe, à une distance quelconque. Si l'on tire les axes secondaires AC et BC , il découle de ce qu'on a déjà vu (454) sur la construction des foyers,

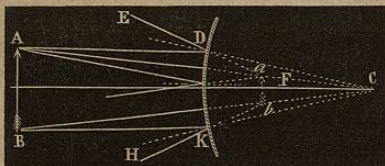


Fig. 317.

dans les miroirs convexes, que tous les rayons émis du point A sont divergents après la réflexion, et que leurs prolongements vont concourir en un point a qui est l'image virtuelle du point A . De même, les rayons émis du point B vont former en b une image virtuelle de ce point. L'œil qui reçoit les rayons divergents DE , KH ,... voit donc en ab une image de AB . Il résulte de cette construction que, quelle que soit la position d'un objet devant un miroir convexe, *l'image est toujours virtuelle, redressée et plus petite que l'objet.*

On peut encore faire usage ici de la deuxième construction qui a été donnée pour les miroirs concaves (fig. 311) : c'est-à-dire, au lieu de considérer un rayon incident quelconque, en prendre un parallèle à l'axe principal; ce qui donne immédiatement la direction du rayon réfléchi, puisque celui-ci, prolongé, doit alors passer par le foyer principal.

457. **Formule relative aux miroirs sphériques.** — La relation qui existe entre la position relative d'un objet et celle de son image dans les miroirs sphériques peut se représenter par une formule très-simple. Pour cela, considérons d'abord un miroir concave, et représentons par R son rayon de courbure, par p la

distance LA de l'objet L au miroir (fig. 318), et par p' la distance lA de l'image à ce même miroir. Dans le triangle LMl , la normale MC partageant l'angle LMl en deux parties égales, on peut appliquer ce théorème de géométrie que, dans tout triangle, la bissectrice d'un angle partage le côté opposé en deux segments qui sont entre eux comme les deux côtés de l'angle; c'est-à-dire que

$$\frac{Cl}{CL} = \frac{lM}{LM}, \text{ d'où } Cl \times LM = CL \times lM.$$

Or, si l'arc AM ne dépasse pas 3 à 6 degrés, les lignes ML et lM sont très-sensiblement égales à AL et à Al , c'est-à-dire à p et à p' . D'ailleurs,

$$Cl = CA - Al = R - p', \text{ et } CL = AL - AC = p - R.$$

Substituant ces diverses valeurs dans l'égalité qui précède, il vient

$$(R - p')p = (p - R)p', \text{ ou } Rp - pp' = pp' - Rp';$$

transposant et réduisant, on trouve $Rp + Rp' = 2pp'$ [1].

Si l'on divise tous les termes de cette égalité par $pp'R$, et qu'on supprime les facteurs communs, elle prend la forme $\frac{1}{p'} + \frac{1}{p} = \frac{2}{R}$ [2], sous laquelle on la considère ordinairement.

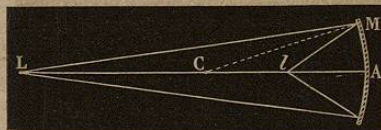


Fig. 318.

En résolvant l'équation [1] par rapport à p' , on en tire $p' = \frac{pR}{2p - R}$ [3], formule qui fait connaître la distance de l'image au miroir, quand on connaît celle de l'objet et le rayon de courbure.

458. **Discussion de la formule des miroirs.** — Cherchons maintenant les différentes valeurs que prend p' suivant celles qu'on donne à p dans la formule [3].

1° Soit d'abord l'objet lumineux ou éclairé placé sur l'axe à une distance infinie, cas où les rayons incidents sont parallèles. Pour interpréter la valeur que prend alors p' , il faut diviser par p les deux termes de la fraction $\frac{pR}{2p - R}$, ce qui donne

$$p' = \frac{R}{2 - \frac{R}{p}} \text{ [4]}. \text{ Or, en introduisant dans cette formule la condition que } p \text{ est in-}$$

fini, la fraction $\frac{R}{p}$ est nulle, et on a $p' = \frac{R}{2}$; c'est-à-dire que l'image se fait au foyer principal; ce qui devait être, puisque les rayons incidents forment alors un faisceau parallèle à l'axe.

2° Si l'objet s'approche du miroir, p décroît, et le dénominateur de la formule [4] diminue, la valeur de p' augmente; par conséquent, l'image s'approche du centre en même temps que l'objet, mais elle est toujours comprise entre le

foyer principal et le centre, car tant que p est $> R$, on a $\frac{R}{2 - \frac{R}{p}} > \frac{R}{2}$ et $< R$.

3° Si l'objet coïncide avec le centre, ce qui s'exprime en faisant $p=R$, il vient $p'=R$, c'est-à-dire que l'image coïncide avec l'objet.

4° L'objet lumineux passant entre le centre et le foyer principal, on a $p < R$, et l'on conclut de la formule [4] que $p' > R$; c'est-à-dire que l'image se fait alors de l'autre côté du centre. Lorsque l'objet est arrivé au foyer principal, on a

$p = \frac{R}{2}$, ce qui donne $p' = \frac{R}{0} = \infty$; c'est-à-dire que l'image se fait à l'infini. En

effet, les rayons réfléchis sont alors parallèles à l'axe.

5° Enfin, si l'objet passe entre le foyer principal et le miroir, on a $p < \frac{R}{2}$; le dénominateur de la formule [4] étant alors négatif, il en est de même de p' ; ce qui indique que la distance p' de l'image au miroir doit se compter sur l'axe en sens contraire de p . En effet, l'image est alors virtuelle et située de l'autre côté du miroir (450).

En introduisant dans la formule [2] la condition que p' est négatif, cette formule devient $\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{2}{R}$; sous cette forme, elle comprend le cas des images

virtuelles dans les miroirs concaves.

Dans le cas des miroirs convexes, l'image étant toujours virtuelle (456), p' et R sont de même signe, puisque l'image et le centre sont d'un même côté du miroir, tandis que, l'objet étant de l'autre côté, p est de signe contraire; en introduisant cette condition dans la formule [2], on trouve, pour la formule relative aux miroirs

convexes, $\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{2}{R}$ [5]. Du reste, on pourrait la trouver directement par les

mêmes considérations géométriques qui ont fait trouver la formule [2] des miroirs concaves.

Il importe d'observer que les différentes formules qui précèdent ne sont pas rigoureuses, puisqu'elles s'appuient sur des hypothèses qui ne le sont pas elles-mêmes, savoir, que les droites LM et l'M (fig. 318) sont égales à LA et à l'A, ce

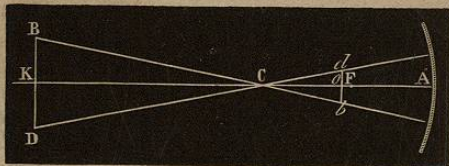


Fig. 319.

qui n'est vrai qu'à la limite, quand l'angle MCA est nul; mais ces formules approchent d'autant plus d'être exactes, que l'ouverture du miroir est plus petite.

459. **Calcul de la grandeur des images.** — A l'aide des formules ci-dessus, on peut facilement calculer la grandeur d'une image, quand on connaît la distance de l'objet, sa grandeur et le rayon du miroir. En effet, si l'on représente l'objet par BD (fig. 319), son image par bd , et si l'on suppose connus la distance KA et le rayon AC, on calcule Ac au moyen de la formule [3] du paragraphe 457. Ac une fois connu, on en déduit cC. Or, les deux triangles BCD et dCb étant sem-

blables, on a entre leurs bases et leurs hauteurs la proportion $\frac{bd}{BD} = \frac{Co}{CR}$, d'où l'on tire la grandeur bd de l'image.

*460. **Aberration de sphéricité, caustiques.** — Dans la théorie qui vient d'être donnée des foyers et des images dans les miroirs sphériques, on a déjà remarqué que les rayons réfléchis ne viennent sensiblement concourir en un point unique qu'autant que l'ouverture du miroir ne dépasse pas 8 à 10 degrés (450). Pour

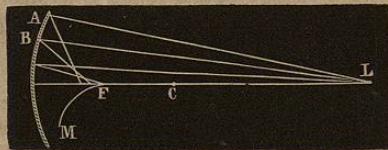


Fig. 326.

une ouverture plus grande, les rayons réfléchis près des bords vont rencontrer l'axe plus près du miroir que ceux qui se sont réfléchis à une petite distance du centre de courbure. De là résulte, dans les images, un défaut de netteté qu'on désigne sous le nom d'*aberration de sphéricité par réflexion*, pour la distinguer de l'aberration de sphéricité par réfraction que présentent les lentilles (483).

Les rayons réfléchis se coupant successivement deux à deux, comme on le voit au-dessus de l'axe FL (fig. 320), leurs points d'intersection forment, dans l'espace, une surface brillante qu'on nomme *caustique par réflexion*. La courbe FM représente une des branches de la section méridienne de cette surface.

461. **Applications des miroirs.** — On connaît les applications des miroirs plans dans l'économie domestique. Ces miroirs sont aussi d'un fréquent usage, dans plusieurs appareils de physique, pour donner à la lumière une direction déterminée. Si c'est la lumière solaire qu'on veut ainsi diriger, on ne peut conserver aux rayons réfléchis une direction constante qu'autant que le miroir est mobile. Il faut, en effet, donner à celui-ci un mouvement qui compense le changement de direction que prennent sans cesse les rayons incidents, en vertu du mouvement diurne apparent du soleil. Ce résultat s'obtient par un mouvement d'horlogerie qui fait varier l'inclinaison du miroir au moyen d'une tige à laquelle celui-ci est fixé. L'appareil ainsi construit a reçu le nom d'*héliostat*. La réflexion de la lumière a encore été utilisée pour mesurer les angles des cristaux avec une grande précision, au moyen d'instruments connus sous le nom de *goniomètres à réflexion*.

Les miroirs sphériques concaves ont aussi reçu de nombreuses applications. On s'en sert comme miroirs grossissants : tels sont les miroirs à barbe. On a déjà vu l'usage qu'on peut en tirer comme miroirs ardents (380); ils sont encore employés dans les télescopes. Enfin, ces miroirs peuvent aussi servir comme réflecteurs pour porter la lumière à de grandes distances, en plaçant une source lumineuse à leur foyer principal; mais, pour cet usage, on doit préférer les miroirs paraboliques.

462. **Miroirs paraboliques.** — Les *miroirs paraboliques* sont des

miroirs concaves dont la surface est engendrée par la révolution d'un arc de parabole AM tournant autour de son axe AX (fig. 321):

On a vu ci-dessus (460) que, dans les miroirs sphériques, les rayons parallèles à l'axe ne viennent qu'approximativement concourir au foyer principal; il en résulte réciproquement qu'une source de lumière étant placée au foyer principal de ces miroirs, les rayons réfléchis ne forment pas rigoureusement un faisceau parallèle à l'axe. Or, ce défaut ne se rencontre pas dans les miroirs paraboliques, qui sont plus

difficiles à construire que les miroirs sphériques, mais dont l'usage est bien préférable pour réflecteurs. En effet, c'est une propriété connue de la parabole, qu'en un point quelconque M de cette courbe, le rayon vecteur FM et la droite ML, parallèle à l'axe, font avec la tangente TT' des angles égaux. Par suite, dans ces sortes de miroirs, tous les rayons parallèles à l'axe vont rigoureusement concourir, après la réflexion, au foyer F du miroir; et, réciproquement, une source de lumière étant placée en ce foyer, les rayons lumineux qui tombent sur le miroir se réfléchissent en donnant naissance à un faisceau rigoureusement parallèle à l'axe. Il suit de là que la lumière ainsi réfléchie tend à conserver la même intensité à une grande distance, car on a vu (438) que c'est surtout la divergence des rayons lumineux qui affaiblit l'intensité de la lumière.

C'est d'après la propriété ci-dessus des miroirs paraboliques, que les lampes qu'on place sur les voitures publiques, ainsi que celles qui sont à l'arrière et à l'avant des trains de chemins de fer, sont munies de réflecteurs paraboliques. Ces sortes de réflecteurs ont aussi été longtemps en usage pour les phares, mais nous verrons bientôt qu'on emploie de préférence aujourd'hui des verres lenticulaires.

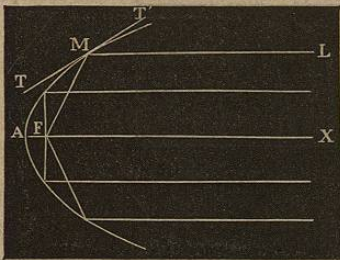


Fig. 321.

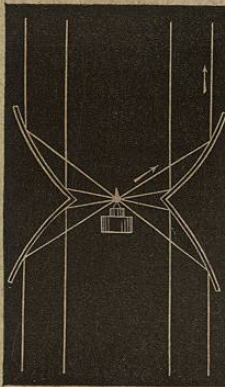


Fig. 322.

En coupant par un plan passant par le foyer et perpendiculaire à l'axe deux miroirs paraboliques égaux, et les réunissant suivant leurs intersections, comme le montre la figure 322, en sorte que leurs deux foyers coïncident, on obtient un système de réflecteurs avec lequel une seule lampe éclaire à la fois dans deux directions opposées. C'est ce système qu'on adopte pour les escaliers, afin de les éclairer en même temps dans toute leur étendue.

CHAPITRE III.

RÉFRACTION SIMPLE, LENTILLES.

463. **Phénomène de la réfraction.** — La réfraction est une déviation qu'éprouvent les rayons lumineux lorsqu'ils passent obliquement d'un milieu dans un autre : par exemple, de l'air dans l'eau ou dans tout autre milieu transparent. Nous disons *obliquement*, car si le rayon lumineux est perpendiculaire à la surface qui sépare les deux milieux, il n'est pas dévié et continue à se propager en ligne droite.

Le rayon incident étant représenté par SO (fig. 323), on nomme *rayon réfracté*, la direction OH que prend la lumière dans le second milieu, et les angles SOA et HOB que forment ces rayons avec la droite AB, normale à la surface qui sépare les deux milieux, sont nommés, l'un, *angle d'incidence*, et l'autre, *angle de réfraction*.

Suivant que le rayon réfracté s'approche ou s'écarte de la normale, on dit que le second milieu est plus ou moins *réfringent* que le premier.

Le calcul montre que le sens de la réfraction dépend de la vitesse relative de la lumière dans les deux milieux. Dans le système des ondulations, le milieu le plus réfringent est celui dans lequel la vitesse de propagation est moindre.

La lumière incidente qui se présente pour passer d'un milieu dans un autre ne pénètre jamais complètement dans celui-ci : une partie se réfléchit à la surface qui sépare les deux milieux, et l'autre partie pénètre seule dans le second.

Dans les milieux non cristallisés, comme l'air, les liquides, le

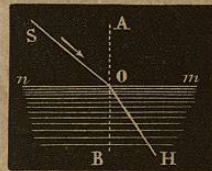


Fig. 323.