deux diaphragmes de même surface. Soit σ cette surface, on aura

$$\frac{I}{I'}=\frac{d^2}{d'^2}=\frac{e\sigma}{e'\sigma}=\frac{e}{e'}.$$

Remarque. — Connaissant le pouvoir émissif e d'une source, on pourra calculer l'éclairement produit par cette source dans toutes les circonstances possibles.

CHAPITRE II

CATOPTRIQUE

—

RÉFLEXION SPÉCULAIRE ET MIROIRS PLANS.

412. **Réflexion spéculaire. — Définitions** et **Lois.** — Lorsqu'un rayon lumineux rencontre une surface polie, il s'y réfléchit d'après certaines lois. C'est le phénomène de la *réflexion régulière* ou *réflexion spéculaire*[1].

On appelle *rayon incident*[2] la direction rectiligne suivant laquelle la lumière tombe sur le miroir; *rayon réfléchi*, la direction suivant laquelle la lumière paraît renvoyée par le miroir; *angle d'incidence*, l'angle du rayon incident avec la normale à la surface au point d'incidence; *angle de réflexion*, l'angle du rayon réfléchi avec la même normale.

Les lois de la réflexion spéculaire sont les suivantes :

1° *Le rayon incident et le rayon réfléchi sont dans un même plan, normal à la surface réfléchissante.*

2° *L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.*

Vérification expérimentale. — Le meilleur procédé est le suivant. On dispose verticalement un cercle gradué M (fig. 452), au centre duquel est fixée une lunette mobile dans un plan parallèle au limbe. On place, à une distance convenable, un petit vase plein de mercure : la surface libre du liquide constitue une surface réfléchissante plane et parfaitement horizontale. Cela fait, on regarde avec la lunette, suivant une direction AE, une étoile de première ou de deuxième grandeur; puis on incline la lunette

1. De *speculum*, miroir.
2. Du latin *incidere*, tomber.

de manière à apercevoir la même étoile dans le bain de mercure Cela a lieu lorsqu'on reçoit dans la lunette les rayons réfléchis DA correspondant aux rayons incidents E'D qui viennent de l'étoile. Or on trouve que les deux directions successives de la lunette, et par suite les deux rayons EA et DA, font des angles égaux avec l'horizontale AH : d'où il est facile de conclure que l'angle

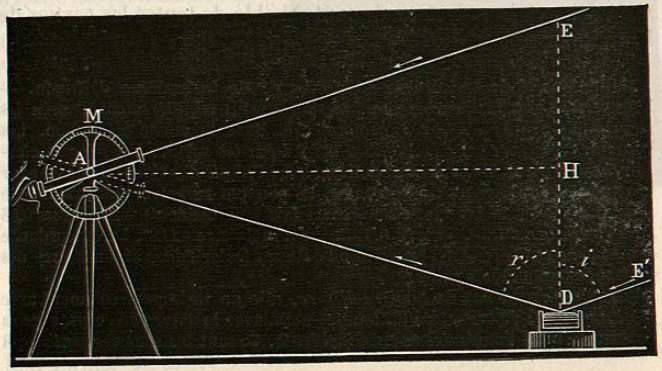

Fig. 452.

d'incidence E'DE est égal à l'angle de réflexion EDA. En effet, DE étant la normale à la surface du mercure, cette droite est perpendiculaire à AH, le triangle AED est isocèle, et les angles ADE et AED sont égaux; mais, les deux rayons lumineux AE et DE, étant parallèles à cause de la grande distance de l'étoile, les angles AED et EDE' sont égaux comme alternes-internes : donc EDE'=EDA.

413. **Réflexion irrégulière** ou **Diffusion.** — La quantité de lumière réfléchie régulièrement, d'après les lois précédentes, est loin de représenter la totalité de la lumière incidente. Celle-ci se partage en deux parties lorsqu'elle tombe sur une surface plus ou moins imparfaitement polie : une portion est réfléchie régulièrement, suivant les lois précédentes; une autre portion est renvoyée, éparpillée dans toutes les directions : on dit qu'elle est *réfléchie irrégulièrement* ou *diffusée*.

La lumière réfléchie irrégulièrement se désigne sous le nom de *lumière diffuse;* c'est grâce à elle que nous voyons les corps éclairés. En effet, la lumière réfléchie régulièrement ne donne pas l'image du corps qui la réfléchit, mais bien celle du corps qui l'émet. Par exemple, si dans une chambre obscure on fait tom-

ber un faisceau de lumière solaire sur une surface bien polie, plus celle-ci réfléchit régulièrement la lumière, moins elle est visible des diverses parties de l'enceinte. L'observateur qui reçoit dans l'œil le faisceau réfléchi ne voit pas le corps lumineux, mais seulement l'image du corps réfléchissant. Qu'on affaiblisse le pouvoir réflecteur de la surface polie en y projetant une poussière légère, la proportion de lumière diffuse augmente, l'image solaire s'affaiblit, et le réflecteur devient visible de toutes les parties de l'enceinte.

414. **Intensité de la lumière réfléchie et de la lumière diffusée.** — Nous verrons plus tard que la lumière se réfléchit régulièrement d'après les mêmes lois que la *chaleur rayonnante*, et dans la même proportion. Les *pouvoirs réflecteurs* pour la lumière sont donc les mêmes que pour la chaleur, et ils varient, de la même manière, avec l'*angle d'incidence;* ainsi, pour le verre et les substances transparentes, le pouvoir réflecteur (c'est-à-dire le rapport du faisceau lumineux réfléchi au faisceau incident) varie depuis 0,05 pour l'incidence de 20°, jusqu'à 0,546 pour l'incidence de 80°. La concordance est la même entre les deux pouvoirs réflecteurs (calorifiques et lumineux) des substances métalliques polies.

Quant à la proportion de *lumière diffuse*, elle ne varie pas seulement avec le *degré de poli* de la surface diffusante, mais avec la nature du corps, avec sa couleur et avec l'*angle des rayons incidents*. Ce sont les surfaces *mates* qui

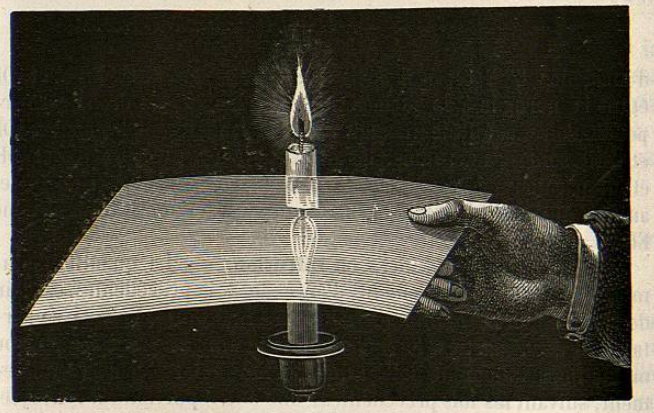

Fig. 453.

diffusent le plus, et en particulier les surfaces *d'un blanc mat*. L'éclat d'une feuille de papier *blanc*, lequel résulte de son grand pouvoir diffusif, est d'autant plus vif que la surface est éclairée plus normalement. Si l'on se place pour regarder la feuille dans des directions de plus en plus obliques, on voit s'affaiblir sensiblement son éclat, ce qui prouve une diminution correspondante dans la proportion des rayons diffusés. En revanche, la proportion des rayons réfléchis augmente dans le même rapport, et si l'on dispose une flamme de bougie très près de la feuille (fig. 453), et qu'on regarde celle-ci sous une incidence rasante, on peut y distinguer une image renversée de la flamme, comme si la feuille avait une surface polie.

Remarque. — La lumière diffuse n'est pas réfléchie suivant d'autres lois que la lumière spéculaire. L'irrégularité de sa réflexion et la dissémination qui en résulte proviennent de ce que la surface des corps mats présente une infinité d'aspérités et de facettes microscopiques, qui reçoivent (fig. 454) la lumière sous des incidences variées et les renvoient nécessairement, d'après les lois mêmes de la réflexion, dans toutes les directions.

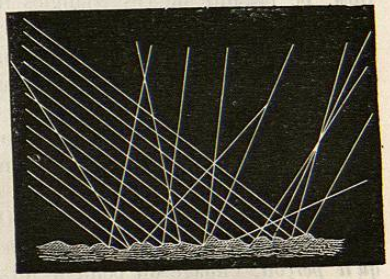

Fig. 454.

415. **Miroirs.** — On nomme *miroir* tout corps dont la surface, parfaitement polie, réfléchit régulièrement la lumière en reproduisant l'image des objets éclairés qu'on lui présente. Suivant leur forme, on divise les miroirs en *miroirs plans, concaves, convexes, sphériques, paraboliques, coniques*, etc.

On appelle *miroir plan* toute surface plane aussi bien polie que possible. Les plus simples des miroirs plans sont constitués par des plans de bronze parfaitement polis. On les appelle *miroirs métalliques*.

416. **Miroirs plans. — Formation des images.** — 1° *Cas d'un point lumineux.* — Soit un point unique A, lumineux ou éclairé, placé devant un miroir plan MN (fig. 455).

Soit AN la normale au miroir; prenons pour plan de la figure un plan passant par AN : c'est un plan normal au miroir, et qui en coupe la surface suivant MN. Ce plan étant évidemment un plan de symétrie de la figure, nous n'avons à considérer que ce qui se passe dans ce plan, et toutes les constructions seront planes.

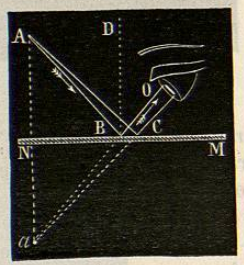

Fig. 455.

Un rayon AB, rencontrant le miroir, s'y réfléchit suivant la direction BO, en faisant l'angle de réflexion DBO égal à l'angle d'incidence ABD. Prolongeons le rayon OB jusqu'à ce qu'il rencontre en un point *a* le prolongement de la normale AN : on forme deux triangles ABN et BN*a*,

qui sont égaux, comme ayant un côté commun BN compris entre deux angles égaux, savoir les angles ANB et *a*NB qui sont droits, et les angles ABN et *a*BN, qui sont égaux tous deux à l'angle OBM. De l'égalité de ces triangles il résulte que *a*N est égal à AN, c'est-à-dire qu'un rayon quelconque AB prend, après la réflexion, une direction telle, que son prolongement vienne couper la perpendiculaire A*a* en un point *a*, symétrique de A par rapport au miroir. Cette propriété, n'étant pas particulière au rayon AB, s'applique à tout autre rayon AC parti du point A; d'où l'on conclut que tous les rayons émis par le point A, et réfléchis sur le miroir, *suivent, après la réflexion, la même direction que s'ils venaient tous du point* a. Or, *l'œil voyant toujours les points lumineux aux points de divergence des faisceaux lumineux qu'il perçoit*, l'image du point A lui apparaît en *a* comme si ce point était réellement lumineux. Donc, dans les miroirs plans, *l'image d'un point se fait derrière le miroir, à une distance égale à celle du point donné, et sur la perpendiculaire abaissée de ce point sur le miroir.*

2° *Cas d'un objet lumineux.* — Il est évident qu'on obtiendra l'image d'un objet quelconque en construisant, d'après la règle ci-dessus, l'image de chacun de ses points, ou du moins de ceux qui suffisent pour en déterminer la position et la forme. La figure 456 montre comment on construira, d'après cette règle, l'image *ab* d'un objet quelconque AB.

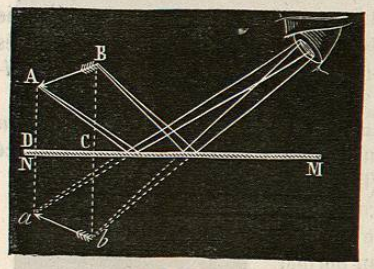

Fig. 456.

De cette construction on déduit que les miroirs plans *donnent une image de même grandeur que l'objet;* car, si l'on rabat le trapèze ABCD sur le trapèze CD*ab*, on constate qu'ils coïncident et que l'objet AB se confond avec son image.

Il en résulte encore que l'image est *symétrique* de l'objet, c'est-à-dire que tous leurs points sont situés deux à deux sur une même perpendiculaire au miroir et à égale distance de part et d'autre.

La figure 457 montre la marche des rayons émis par la flamme d'une bougie, réfléchis sur un miroir plan, puis reçus par l'œil d'un observateur.

417. Champ d'un miroir plan. — Il n'est pas nécessaire que l'objet lumineux soit placé juste en face du miroir pour que son image soit vue par un

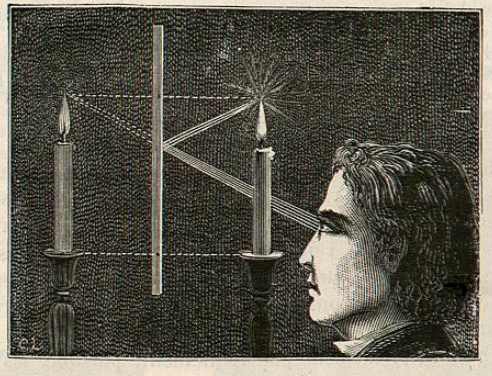
Fig. 457.

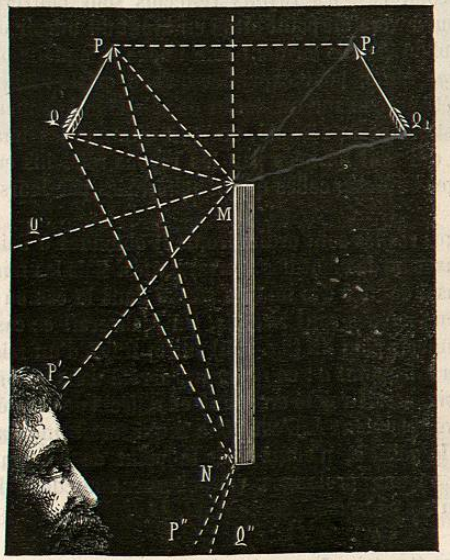

Fig. 458

observateur : il suffit que l'œil reçoive une portion du faisceau réfléchi. Cette condition sera évidemment remplie s'il se trouve dans l'espace P'MNQ', qu'on

appelle *champ du miroir* (fig. 458). Cet espace est le lieu géométrique commun aux rayons réfléchis qui proviennent de tous les points de l'image.

En effet, pour l'extrémité P, ce lieu est déterminé par les rayons MP′ et NP″ qui correspondent aux rayons incidents PM et PN, et dont les prolongements iraient se couper au point P_1. De même pour l'extrémité Q, ce lieu est déterminé par les droites MQ′ et NQ″. Donc l'œil doit être placé dans la partie commune à ces deux lieux extrêmes, c'est-à-dire dans la région P′MNQ″, pour qu'on puisse recevoir des rayons réfléchis provenant de tous les points de l'image, et, par suite, apercevoir l'image tout entière.

418. **Images virtuelles et images réelles.** — Il y a deux cas à distinguer dans la réflexion par les miroirs plans : le faisceau réfléchi peut être *divergent* ou *convergent*. Dans le premier cas, les rayons réfléchis ne se rencontrent pas; mais si on les conçoit prolongés de l'autre côté du miroir, leurs prolongements concourent en un même point (fig. 455 et 456). L'œil, impressionné alors comme si les rayons étaient partis de ce point, y voit une image. Or celle-ci n'existe pas réellement, puisque les rayons lumineux ne passent pas de l'autre côté du miroir; elle n'est qu'une illusion de l'œil; on lui donne le nom d'*image virtuelle*. Dans le second cas, les rayons réfléchis sont convergents et ils vont concourir vers un point situé en avant du miroir et du même côté que l'objet. Là ils forment une image à laquelle on donne le nom d'*image réelle*, pour exprimer qu'elle existe réellement; car elle peut être reçue sur un écran et agir chimiquement sur certaines substances. En résumé, on peut dire que les images *réelles* sont celles qui sont formées par les rayons réfléchis eux-mêmes, et les images *virtuelles* celles qui sont formées par leurs prolongements.

Les images réelles sont ordinairement obtenues à l'aide des miroirs concaves ou des lentilles convergentes. Mais les miroirs plans peuvent aussi donner des images *réelles* dans le cas où les objets lumineux eux-mêmes sont *virtuels*. On réaliserait ce cas en interposant un miroir plan MN (fig. 455) sur le trajet d'un faisceau convergent vers le point *a* : ce faisceau, arrêté dans sa propagation par le miroir, serait rejeté en avant et réfléchi de manière à venir converger vers le point A. C'est donc A qui serait une *image réelle*, tandis que le point *a*, n'étant que le point de concours géométrique des rayons prolongés virtuellement au delà du miroir, ne serait qu'un *point lumineux virtuel*.

419. **Miroirs étamés. — Images multiples.** — Les miroirs les plus simples sont les miroirs métalliques : ils n'ont qu'*une seule surface réfléchissante* et ne produisent qu'*une seule image*. Il n'en est plus ainsi des miroirs de verre : ceux-ci donnent naissance à plusieurs images, qu'on observe facilement lorsqu'on regarde obliquement dans une glace l'image d'une bougie. On voit

une première image peu intense, puis une deuxième beaucoup plus vive, et derrière celle-ci plusieurs autres dont l'intensité décroît rapidement.

Ce phénomène est dû à ce que les miroirs en verre *étamé* présentent : 1° une surface antérieure, que frappent d'abord les rayons incidents; 2° la couche d'amalgame métallique ou *tain* qui recouvre la face postérieure. Lorsque les rayons partis du point A (fig. 459) rencontrent la première surface, une portion est réfléchie immédiatement et donne du point A une première image *a* formée par le prolongement des rayons tels que *b*E; l'autre partie pénètre dans le verre, se réfléchit en *c* sur la couche du tain, revient à l'œil suivant la direction *d*H, et donne l'image *a′*. Celle-ci est distante de la première du double de l'épaisseur du miroir et est beaucoup plus intense, parce que les métaux polis ont un pouvoir réflecteur beaucoup plus grand que le verre.

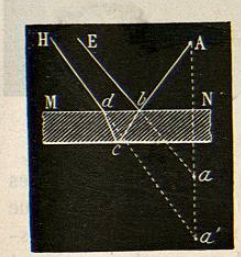

Fig. 459.

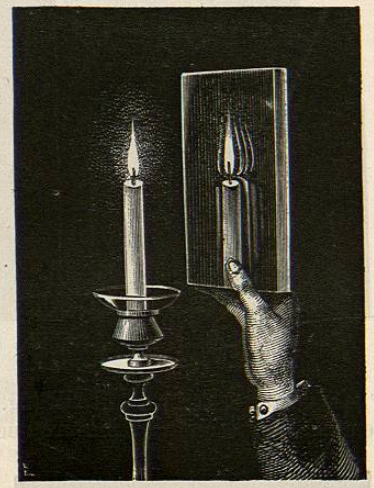
Fig. 460.

Quant aux autres images, elles résultent d'une série de réflexions que la lumière subit successivement à la surface interne des faces supérieure et inférieure du miroir. D'ailleurs, chacune de ces réflexions étant accompagnée de réfraction et de diffusion, il y a une perte de lumière considérable, qui affaiblit les images et finit par les rendre invisibles. La figure 460 montre les images multiples d'une bougie, obtenues par réflexion dans une lame de verre à faces parallèles qui constitue un miroir analogue à un miroir *étamé*.

420. **Images multiples dans deux miroirs plans inclinés.** — Lorsqu'un objet est placé entre deux miroirs dont les plans se coupent sous un angle plus ou moins aigu, on voit des images multiples, dont le nombre augmente avec l'inclinaison des miroirs.

Si les miroirs sont perpendiculaires l'un à l'autre, on aperçoit trois images disposées comme le montre la figure 461. O étant le point lumineux, les rayons tels que OC et OD, partis de ce point, donnent, après une seule réflexion, les uns l'image O′, les autres

l'image O″; et les rayons tels que OA, qui ont subi deux réflexions, en A et en B, donnent la troisième image O‴.

Si l'angle des miroirs est de 60°, il se forme *cinq* images (fig. 462);

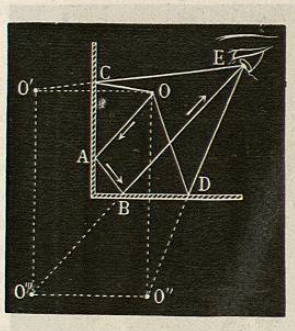

Fig. 461.

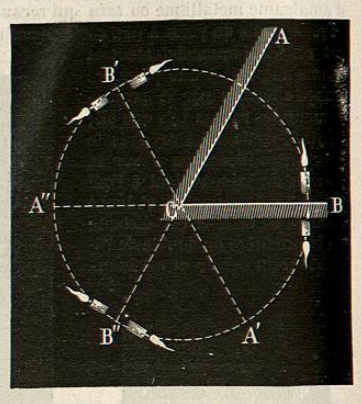

Fig. 462.

s'il est de 45°, il s'en produit *sept* (fig. 463). Le nombre des images continue ainsi à croître à mesure que l'angle diminue, parce que les rayons lumineux subissent un nombre croissant de réflexions successives sur l'un et l'autre miroir.

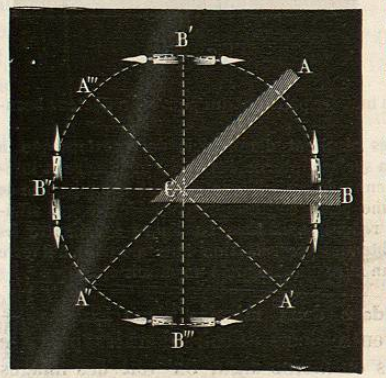

Fig. 463.

421. **Kaléidoscope.** — C'est sur la propriété des miroirs inclinés qu'est fondé le *kaléidoscope*, petit appareil imaginé par Brewster. Il est formé d'un tube de carton dans lequel sont deux miroirs inclinés à 45°, ou trois miroirs inclinés à 60°. De menus objets de forme irrégulière, tels que des fragments de verre coloré, de mousse ou de dentelle, sont placés à l'une des extrémités, entre deux disques de verre, l'un transparent et l'autre dépoli. Lorsqu'on regarde par l'autre bout, on aperçoit ces objets et leurs images, symétriquement disposés, ce qui donne un ensemble très varié et plus ou moins curieux. La figure 464 montre un spécimen d images symétriques, vues dans un kaléidoscope.

422. **Images multiples données par deux miroirs parallèles.** —

Dans le cas de deux miroirs parallèles, le nombre des images des

Fig. 464.

objets placés entre eux est *théoriquement infini*. Physiquement, ce nombre est limité, parce que, la lumière incidente ne se réfléchissant jamais en totalité, les images perdent de plus en plus de leur éclat et finissent par s'éteindre tout à fait.

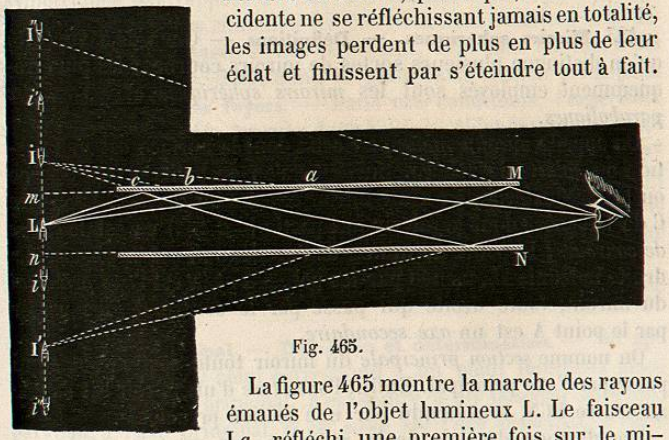

Fig. 465.

La figure 465 montre la marche des rayons émanés de l'objet lumineux L. Le faisceau L*a*, réfléchi une première fois sur le miroir M, donne en I l'image de l'objet L, à une distance $mI = mL$;

le faisceau Lb, réfléchi une première fois sur le miroir M, puis une deuxième fois sur le miroir N, fournit l'image I′ à une distance $nI' = nI$; de même le faisceau Lc, après deux réflexions sur M et une sur N, forme l'image I″ à une distance $mI'' = mI'$; et ainsi de suite jusqu'à l'infini. Quant aux images i, i', i'', elles sont formées de la même manière par les rayons de lumière qui, partis de l'objet L, tombent d'abord sur le miroir N.

On vérifiera aisément ce cas de la réflexion si MN est la section d'un tube de verre dont la surface extérieure serait noircie, tandis que la surface interne constituerait un miroir cylindrique. L'œil étant placé à l'ouverture MN, l'autre côté serait fermé par un disque opaque, percé en son centre d'un petit trou bien éclairé par la lumière L. Deux arêtes opposées du tube sont comme deux miroirs linéaires parallèles, et donnent les deux séries d'images I, I′, I″,... et i, i', i''...; donc, par raison de symétrie, on verra dans le tube deux séries de cercles lumineux, concentriques au trou lumineux, dont les rayons seront égaux à LI, LI′, LI″,... pour une série, et à Li, Li', Li'',... pour l'autre. Leur éclat diminue d'ailleurs rapidement à mesure que leur diamètre augmente.

CHAPITRE III

CATOPTRIQUE (SUITE)

—

MIROIRS COURBES.

423. **Miroirs sphériques. — Définitions.** — On a déjà vu (415) qu'on distingue plusieurs sortes de miroirs courbes; les plus fréquemment employés sont les *miroirs sphériques* et les *miroirs paraboliques*.

On appelle *miroirs sphériques* ceux dont la surface est une portion ou *calotte* de sphère. Suivant qu'on en polit la face interne ou la face externe, on a un miroir *concave* ou *convexe*. Le centre C de la sphère dont le miroir fait partie (fig. 466) en est le *centre de courbure;* le point A, milieu de l'arc MN, en est le *sommet*. La droite indéfinie AL, menée par les points A et C, est l'*axe principal* du miroir; toute droite qui passe par le centre C sans passer par le point A est un *axe secondaire*.

On nomme *section principale* du miroir toute section plane qui passe par l'axe principal. Enfin, l'*ouverture* d'un miroir est l'angle au centre MCN, sous-tendu par une section principale.

L'application des lois de la réflexion aux miroirs courbes se fait aisément en considérant leur surface comme formée d'une

infinité d'*éléments* plans, infiniment petits. La *normale* à la surface courbe, en un point donné, est alors la perpendiculaire à l'élément correspondant ou, ce qui est la même chose, au plan tangent qui le contient: dans le cas des miroirs sphériques, la normale est donc simplement le *rayon* géométrique du point considéré.

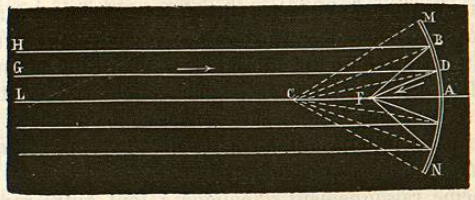

Fig. 466.

424. **Miroirs concaves. — Étude géométrique et expérimentale. (Cas des rayons centraux.)** — Cette étude est fondée sur l'application des lois de la réflexion à des miroirs de *petite ouverture*, c'est-à-dire dont l'angle au centre ne dépasse pas 8 ou 9 degrés et n'admettant que des *rayons centraux* c'est-à-dire des rayons parallèles à l'axe principal ou très peu inclinés sur cet axe.

Dans les miroirs sphériques, et dans tous les miroirs de révolution, lorsque l'objet lumineux est symétriquement placé par rapport à l'axe principal, tous les phénomènes sont eux-mêmes symétriques par rapport à l'une des sections principales. Cette remarque permet de simplifier les constructions relatives à la détermination des images en les réduisant, dans tous les cas, *à des constructions planes*, faites dans le plan de la section principale.

425. **Définition des foyers.** — Dans ces conditions, *l'expérience prouve* qu'un miroir concave donne, d'un objet lumineux placé devant lui, une image nette, réelle ou virtuelle. On doit en conclure qu'à chaque point lumineux de l'objet correspond un point lumineux *unique* dans l'image; ce dernier est soit le point de concours de tous les rayons réfléchis qui proviennent d'un même point lumineux, soit le point de concours de leurs prolongements : dans le premier cas, on l'appelle *foyer réel*, et dans le deuxième cas *foyer virtuel*.

426. **Foyer principal. — Définition et détermination.** — On appelle *foyer principal* celui correspond à un point lumineux placé à l'infini sur l'axe principal, c'est-à-dire à un faisceau incident, parallèle à l'axe principal. *Il est situé sur l'axe principal, à égale distance du centre et du sommet.* Il est toujours *réel*.