

Comme précédemment, ce résultat n'est qu'approximatif, et c'est pour que l'aberration puisse être négligée qu'il faut que l'axe secondaire fasse seulement un petit angle avec l'axe principal.

Il est évident, sans qu'il soit nécessaire d'insister, que les foyers secondaires sont réels dans les miroirs concaves (fig. 153) et virtuels dans les miroirs convexes (fig. 154). Les propriétés déduites de la réversibilité sont également applicables à ces foyers secondaires.

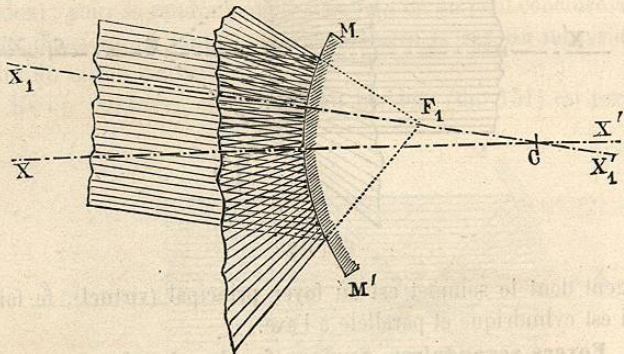


Fig. 154.

A chaque direction d'axe secondaire correspond un foyer secondaire; pour un miroir déterminé, tous les foyers secondaires sont sur une surface sphérique ayant pour centre le centre C du miroir, et pour rayon la moitié du rayon du miroir. Cette portion de sphère, lieu des foyers secondaires, est appelée une *surface focale*.

La surface focale n'a que peu d'amplitude puisque les axes secondaires considérés doivent faire de petits angles avec l'axe principal. A cause de cette petite amplitude, cette portion de sphère peut être remplacée, sans erreur sensible au point de vue pratique, par le plan tangent au point F, plan perpendiculaire à l'axe principal. Ce plan est appelé le *plan focal*.

**373. Points conjugués.** — On démontre dans les cours élémentaires, et nous admettons, que lorsqu'un faisceau incident conique a son sommet sur l'axe principal, il donne, après réflexion, un faisceau qui est également homocentrique et dont le sommet est aussi sur l'axe : on arrive même à trouver une formule qui permet de déterminer ce second point.

Soit par exemple A (fig. 155) le point lumineux envoyant un faisceau divergent sur le miroir MM', le faisceau réfléchi sera dans ce cas MA'M'; le point A' est donc l'image du point A.

Mais, dans cette figure, si nous appliquons la réversibilité, nous voyons que, si A' était un point lumineux, la lumière marcherait en sens contraire et que A serait le sommet du faisceau réfléchi : le point A peut donc être considéré comme l'image de A'.

Les deux points A et A', tels que chacun d'eux peut être regardé comme l'image de l'autre, sont dits des *points conjugués*<sup>1</sup>.

**374. Forme des faisceaux réfléchis.** — L'emploi de la formule des points conjugués permet d'étudier les différents cas qui peuvent se présenter; mais cette étude, cette discussion des miroirs, peut se faire presque intuitivement en s'appuyant sur les propriétés connues du plan focal.

**1° Miroirs concaves.** — Nous savons que si le faisceau incident est cylindrique, parallèle à l'axe, le faisceau réfléchi est convergent et a son sommet réel au foyer principal.

Il est clair que si le faisceau incident (fig. 156) est convergent (corres-

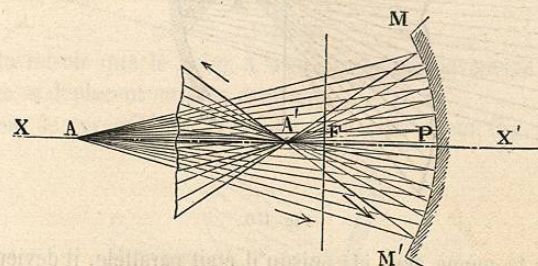


Fig. 155.

pondant à un point lumineux virtuel A derrière le miroir), le faisceau réfléchi sera plus convergent que dans le cas précédent, l'image A', réelle, se fera entre le foyer principal et le miroir. Plus le point A se rapproche du miroir, plus, par conséquent, le faisceau incident est convergent, plus le faisceau réfléchi doit aussi être convergent, plus le point A' s'approche du miroir : le point A et son image se déplacent donc en sens contraire.

Si le faisceau incident part du foyer F, le faisceau réfléchi est parallèle; si le faisceau part d'un point A (fig. 157) compris entre F et le miroir, le faisceau incident devient plus divergent, il doit donc en être de même du faisceau réfléchi qui devient divergent, son sommet étant en A' derrière le miroir.

On aurait pu, d'ailleurs, trouver par une autre voie les résultats que nous venons d'obtenir.

En effet la figure 156 étant réversible, on voit que si A' est le point lumineux entre le foyer F et le miroir, le faisceau réfléchi est divergent, l'image est en A derrière le miroir, virtuelle; elle est d'autant plus

1. On dit quelquefois aussi des *foyers conjugués* : mais le mot *foyer* ayant un autre sens déterminé lorsqu'il est seul, son emploi dans ce cas peut amener des confusions.



éloignée que le point  $A'$  est plus près du foyer, et les deux points conjugués se déplacent en sens contraire.

Mais si le point lumineux, partant de  $F$  (fig. 155), s'éloigne du miroir, le faisceau incident devient moins divergent : le faisceau réfléchi devra

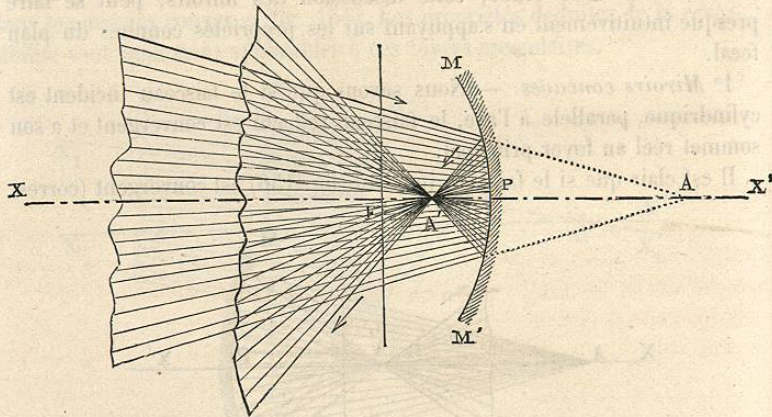


Fig. 156.

varier dans le même sens et, puisqu'il était parallèle, il devient convergent, son sommet étant en  $A'$  et l'image est réelle. Plus le point lumineux s'éloigne de  $F$ , moins le faisceau incident est divergent, plus le faisceau réfléchi doit être convergent, plus l'image  $A'$  se rapproche du

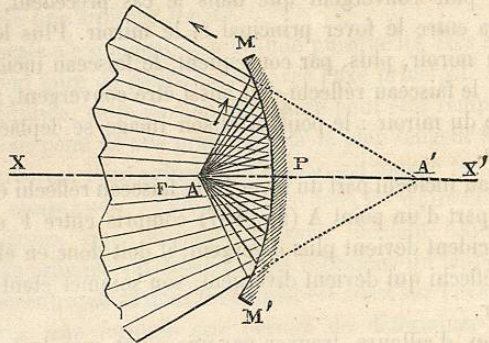


Fig. 157.

foyer : le point lumineux et son image se déplacent donc en sens contraire.

*Miroirs convexes.* — Par des raisonnements aussi simples que les précédents, et partant des propriétés du foyer principal, on arrive aux conclusions suivantes.

Quand le point lumineux  $A$  (fig. 158) est situé en avant du miroir, il envoie un faisceau divergent : le faisceau réfléchi doit être plus diver-

gent que s'il partait du foyer, son sommet  $A'$ , image virtuelle dans ce cas, doit donc se trouver entre le foyer et le miroir, d'autant plus rap-

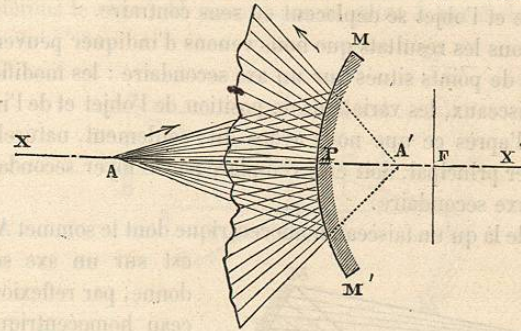


Fig. 158.

proché du miroir que le point  $A$  s'en rapproche davantage : le point et son image se déplacent en sens contraire.

Par voie de réversibilité, si un faisceau convergent (fig. 159) a son

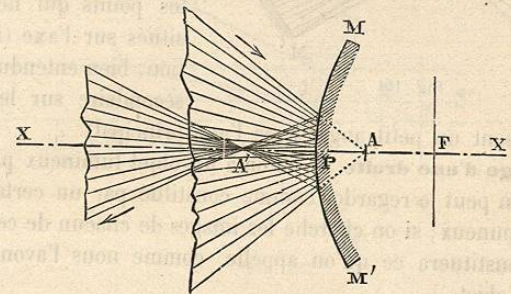


Fig. 159.

sommet (virtuel)  $A$  entre le miroir  $P$  et le foyer  $F$ , le faisceau réfléchi est convergent, son sommet  $A'$ , image du point  $A$ , est réel.

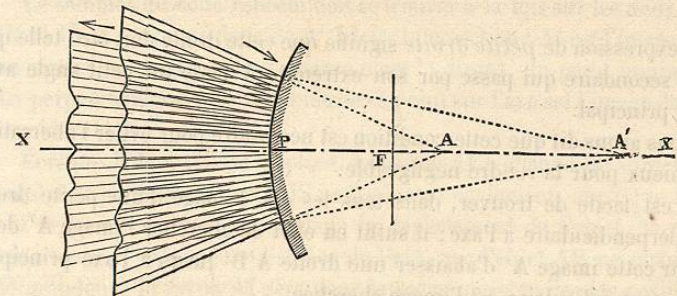


Fig. 160.

Si un faisceau incident a son sommet virtuel  $A$  (fig. 160) au delà du foyer  $F$ , la convergence de ce faisceau est moindre que s'il aboutissait



en F : le faisceau réfléchi, au lieu d'être parallèle, est divergent, il a donc son sommet A', image du point A, à droite du foyer F; ce sommet est virtuel. L'image et l'objet se déplacent en sens contraire.

375. — Tous les résultats que nous venons d'indiquer peuvent s'appliquer aux cas de points situés sur un axe secondaire : les modifications de forme des faisceaux, les variations de position de l'objet et de l'image sont les mêmes, d'après ce que nous avons dit; seulement, naturellement le point F, foyer principal, doit être remplacé par le foyer secondaire F' qui existe sur l'axe secondaire.

Il résulte de là qu'un faisceau homocentrique dont le sommet A (fig. 161)

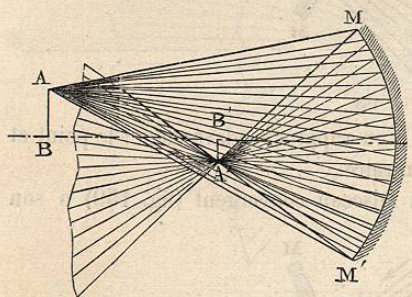


Fig. 161.

est sur un axe secondaire, donne, par réflexion, un faisceau homocentrique dont le sommet A' est sur ce même axe. La conservation, approximative de l'homocentricité existe donc également pour les points qui ne sont pas situés sur l'axe (à la condition, bien entendu, que l'axe secondaire sur lequel ils se

trouvent fassent un petit angle avec l'axe principal).

376. **Image d'une droite.** — Si on a un objet lumineux placé devant un miroir, on peut le regarder comme constitué par un certain nombre de points lumineux; si on cherche les images de chacun de ceux-ci, leur ensemble constituera ce qu'on appelle, comme nous l'avons déjà dit, l'image de l'objet.

On démontre dans les cours élémentaires, et nous admettrons par conséquent, que si l'objet est une petite droite AB (fig. 161) perpendiculaire à l'axe principal l'image est aussi une droite perpendiculaire A'B' à cet axe.

L'expression de *petite droite* signifie que cette droite doit être telle que l'axe secondaire qui passe par son extrémité A fasse un petit angle avec l'axe principal.

Nous avons dit que cette condition est nécessaire pour éviter l'aberration ou mieux pour la rendre négligeable.

Il est facile de trouver, dans tous les cas, l'image d'une petite droite AB perpendiculaire à l'axe; il suffit en effet de chercher l'image A' de A et par cette image A' d'abaisser une droite A'B' jusqu'à l'axe principal; cette perpendiculaire est l'image cherchée.

L'image A' du point A est le sommet du cône homocentrique réfléchi correspondant au cône incident dont A est le sommet. Tous les rayons réfléchis passant en A', ce point est complètement déterminé si on connaît

deux rayons réfléchis : on peut en s'appuyant sur les propriétés du foyer principal construire facilement ces deux rayons (fig. 162 et 163).

Considérons le rayon AI passant par le point A parallèlement à l'axe;

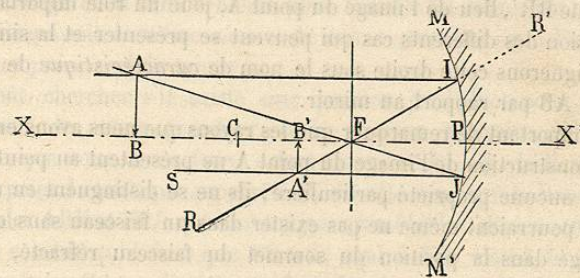


Fig. 162.

comme après la réflexion il doit passer par le foyer F, on l'obtient en joignant IF.

Prenons, d'autre part, le rayon qui, partant de A, passe par le foyer F

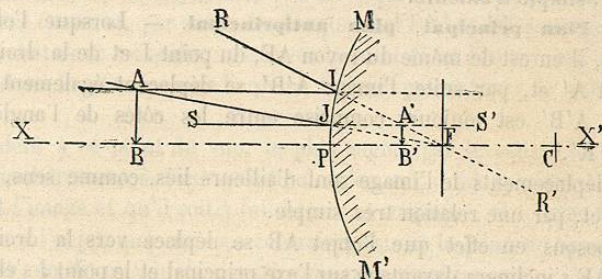


Fig. 163.

et vient rencontrer en J la surface du miroir. Après la réflexion, le rayon réfléchi correspondant est devenu parallèle à l'axe principal, on peut donc le tracer immédiatement en JS.

Le sommet du cône réfléchi doit se trouver à la fois sur les deux droites IR et JS, il se trouve donc en A' à leur intersection : A' est l'image, réelle ou virtuelle suivant les cas comme nous le dirons, du point lumineux A. La perpendiculaire A'B' abaissée de ce point sur l'axe est l'image de l'objet considéré AB.

Lorsque l'objet AB se déplace, le rayon AFJ change de direction; le point J et par suite le rayon JS se déplacent également, ainsi que l'image qui se trouve sur JS. Mais, dans le déplacement de l'objet, le point A reste toujours à la même distance de l'axe, car l'objet AB ne change pas de grandeur; le rayon AI sera donc le même pour toutes les positions de l'objet et il en sera de même du rayon réfléchi IR. L'image A' doit toujours être sur le rayon immobile : ce rayon est donc le *lieu géométrique* de cette image A'.



Comme, d'autre part, le point B étant sur l'axe, son image est également sur l'axe qui est le lieu géométrique de B', l'image A'B' est toujours nécessairement comprise entre les deux droites XX' et RR'.

La droite RR', lieu de l'image du point A, joue un rôle important dans la discussion des différents cas qui peuvent se présenter et la simplifie : nous désignerons cette droite sous le nom de *caractéristique* de l'image de l'objet AB par rapport au miroir.

Il est important de remarquer que les rayons que nous avons employés pour la construction de l'image du point A ne présentent au point de vue physique aucune propriété particulière ; ils ne se distinguent en rien des autres et pourraient même ne pas exister dans un faisceau sans que rien fût changé dans la position du sommet du faisceau réfracté, dans la position de l'image. Les rayons ne sont même pas nécessaires au point de vue géométrique ; leur emploi simplifie seulement les constructions et les démonstrations, mais ils pourraient être remplacés par deux autres rayons quelconques pour lesquels il faudrait effectuer une construction spéciale, simple d'ailleurs.

**377. Plan principal, plan antiprincipal.** — Lorsque l'objet se déplace, il en est de même du rayon AF, du point J et de la droite JS : le point A' et, par suite, l'image A'B', se déplacent également. Mais, l'image A'B' est toujours comprise entre les côtés de l'angle XFR ou X'FR'.

Les déplacements de l'image sont d'ailleurs liés, comme sens, à ceux de l'objet, par une relation très simple.

Supposons en effet que l'objet AB se déplace vers la droite : la droite AF s'inclinera davantage sur l'axe principal et le point J s'éloignera du point P, le rayon réfléchi s'éloignera de l'axe principal ; l'image A'B' devra donc grandir et par suite, devant rester comprise dans l'angle XFR, elle devra s'éloigner du sommet F de cet angle, elle se déplacera donc de la droite vers la gauche, c'est-à-dire en sens contraire de l'objet.

En examinant les divers cas particuliers qui peuvent se présenter, on reconnaît qu'il en est toujours ainsi et que l'on peut énoncer la règle générale suivante :

Un objet et son image donnée par un miroir sphérique se déplacent toujours en sens contraire.

Il est intéressant de remarquer que, à cause de la faible amplitude de la surface réfléchissante qui permet de confondre sensiblement les arcs de cercle avec des lignes droites, la ligne PI peut être regardée comme égale à l'objet AB, et la ligne PJ comme égale à l'image A'B'.

Si l'objet AB est appliqué contre la surface réfléchissante en PI, par exemple, il n'y a pas réflexion à proprement parler, et les faisceaux arrivant à l'œil d'un observateur placé devant le miroir sont les mêmes, que ce miroir existe ou qu'il n'existe pas : l'image fournie par le miroir

coïncide donc avec l'objet lui-même et est, par conséquent, de même sens et de même grandeur que celui-ci.

Considéré à ce point de vue le plan dans lequel est alors l'objet (plan tel que, l'image étant dans le même plan, il soit à lui-même son conjugué et que l'image soit de même sens et de même grandeur que l'objet) est dit le *plan principal* du miroir.

On peut chercher s'il existe une position de l'objet pour laquelle l'image soit de même grandeur, mais de sens contraire. D'après la remarque que nous avons faite, il faut alors que PJ (fig. 162) soit égale à AB, le point J étant, par rapport à P, du côté opposé à I. Dans ce cas, les triangles ABF et FPJ, qui sont toujours semblables, deviennent égaux, et on en conclut qu'il faut que FB soit égal à FP, c'est-à-dire que le point B soit en C, que l'objet soit dans le plan perpendiculaire à l'axe passant par le centre du miroir.

Il est aisé de déterminer la position qu'occupe alors l'image : celle-ci étant égale à l'objet, il faut que les longueurs A'B' et PI aient la même grandeur. Les deux triangles A'B'F et FPI, qui sont toujours semblables, deviennent égaux et, par suite, les longueurs FBR' et PF sont égales : le point B' doit donc coïncider aussi avec le point C, et l'image est, comme l'objet, dans le plan perpendiculaire à l'axe passant par le centre du miroir<sup>1</sup>.

Considéré à ce point de vue, le plan mené par le centre du miroir perpendiculairement à l'axe principal (plan tel qu'il contient à la fois l'objet et l'image et qu'il soit à lui-même son conjugué, et tel que l'image soit égale à l'objet, mais de sens contraire) est dit le *plan antiprincipal* du miroir ; on dit quelquefois aussi *plan principal inverse*.

Les plans focal, principal et antiprincipal considérés ensemble sont dits les plans cardinaux du miroir.

**378. Discussion des miroirs.** — Nous avons maintenant les éléments suffisants pour faire sans difficulté la *discussion* des miroirs, c'est-à-dire pour examiner les différents cas possibles qui peuvent se présenter lorsque l'objet occupe successivement toutes les positions possibles par rapport au miroir.

Le plan focal, le plan principal, le plan antiprincipal, divisent l'espace en quatre régions que peut parcourir successivement l'objet : nous les désignerons par leur rang à partir de la gauche.

Il y aura à rechercher, lorsque l'objet occupera chacune de ces régions, quelle est la région occupée par son image, quelle est sa nature, réelle ou virtuelle, son sens, droite ou renversée, et sa grandeur, agrandie ou diminuée.

1. La démonstration, faite dans le cas d'une figure représentant un miroir concave, s'appliquerait sans modification aucune au cas du miroir convexe et les conclusions seraient les mêmes.



Occupons-nous d'abord de la nature de l'objet et de l'image : les résultats que nous indiquerons sont applicables aussi bien aux miroirs concaves qu'aux miroirs convexes.

Avec la disposition que nous avons adoptée pour les figures, la lumière venant de la gauche, un objet, à proprement parler, ne peut être situé qu'à gauche de la surface réfléchissante : dans ce cas, il enverra, sur le miroir, de la lumière parallèle s'il est à une très grande distance, à gauche, de la lumière divergente dans tous les autres cas. Mais il peut également arriver sur le miroir de la lumière convergente, correspondant à des faisceaux dont le sommet serait à droite du miroir : il est nécessaire d'examiner également ces cas ; nous avons dit que les sommets de ces faisceaux sont des points lumineux virtuels (351) ; la réunion de sommets de ce genre est un objet lumineux virtuel. C'est donc la surface du miroir qui limite les régions de l'espace où les objets lumineux sont réels ou virtuels.

D'autre part, dans tous les cas, les faisceaux réfléchis convergents, qui correspondent à des images réelles, ont leur sommet à gauche du miroir ; les faisceaux réfléchis divergents, qui correspondent à des images virtuelles, ont leur sommet à droite du miroir. C'est donc aussi la surface du miroir qui limite dans l'espace les régions où l'image est réelle ou virtuelle.

379. — On peut arriver également à des résultats simples et généraux relativement au sens et à la grandeur.

En supposant, comme nous l'avons fait, l'objet constitué par une droite placée au-dessus de l'axe, et remarquant que l'image est toujours comprise entre cet axe et la caractéristique, on voit que l'image sera droite lorsqu'elle se fera sur la partie de la caractéristique qui est au-dessus de l'axe, soit à droite du plan focal pour le miroir concave, à gauche de ce plan pour le miroir convexe ; — l'image sera renversée lorsqu'elle se fera sur la partie de la caractéristique qui est au-dessous de l'axe, soit à gauche du plan focal pour le miroir concave, à droite de ce plan pour le miroir convexe. Le plan focal sépare donc dans tous les cas les régions de l'espace où l'image est droite de celles où elle est renversée.

La détermination générale de la grandeur peut être obtenue également par des considérations applicables à tous les cas.

L'image est égale à l'objet lorsqu'elle est dans le plan principal et lorsqu'elle est dans le plan antiprincipal ; comme, d'autre part, elle doit toujours rester comprise dans l'angle formé par la caractéristique avec l'axe, elle sera plus petite que l'objet si elle est située plus près que ces plans du sommet de cet angle. Ce sommet qui est le foyer est toujours situé entre le plan principal et le plan antiprincipal ; c'est donc lorsque l'image sera formée entre ces plans qu'elle sera diminuée.

Inversement, par suite, elle sera agrandie lorsqu'elle sera formée en dehors de l'espace limité par ces plans.

380. — Il reste enfin, pour terminer la discussion, à indiquer à quelle position se trouve l'image lorsque l'objet a une position déterminée. Cette position se trouverait exactement, bien entendu, par la construction que nous avons donnée : mais le plus souvent, pour les applications, cette détermination exacte n'est pas nécessaire, et il suffit de connaître la région où se fait cette image, ces régions étant, comme pour les objets, limitées aux plans cardinaux.

On arrive aisément à cette détermination en se rappelant que le plan principal est à lui-même son propre conjugué ; qu'il en est de même du plan antiprincipal ; que le plan focal est conjugué de l'infini ; et enfin que l'image et l'objet se déplacent toujours en sens contraire.

Dès lors si nous supposons un objet placé dans le plan principal P, l'image est dans le même plan : si l'objet se déplace dans un sens vers le foyer, parcourant la région P-F, l'image se déplacera en sens contraire jusqu'à l'infini, parcourant par conséquent la région P-∞.

Ramenant l'objet et l'image dans le plan principal P et déplaçant l'objet de manière qu'il parcoure la région allant de ce plan à l'infini, l'image se déplacera en sens contraire parcourant la région P-F et atteignant ce dernier point lorsque l'objet arrivera à l'infini.

Supposons l'objet dans le plan antiprincipal C où se trouvera aussi l'image ; si l'objet se déplace vers le foyer, parcourant la région C-F, l'image se déplacera en sens contraire jusqu'à l'infini, parcourant la région C-∞. Ramenant l'objet et l'image au plan antiprincipal C et déplaçant l'objet de C vers l'infini, l'image se déplacera de C en F, atteignant ce point lorsque l'objet sera à l'infini, parcourant, par conséquent, la région C-F.

381. — Nous avons maintenant tous les éléments de la discussion ; mais si les résultats précédents sont généraux, les plans cardinaux ne sont pas disposés dans le même ordre suivant qu'il s'agit d'un miroir concave ou d'un miroir convexe, et de même la caractéristique présente des directions différentes. Mais il suffit d'appliquer les indications trouvées pour chaque partie de la discussion pour terminer celle-ci.

La discussion est alors résumée par les deux tableaux suivants dans lesquels les régions qui se correspondent pour les images et les objets ont le même numéro (fig. 164 et 165).

On voit immédiatement comment étant donnée la position d'un objet dans une région, on voit d'abord s'il est réel ou s'il est virtuel ; en se reportant aux indications relatives aux images, on voit immédiatement, par la concordance des chiffres, dans quelle région cette image se trouve, et on en déduit les autres caractères qui sont indiqués au-dessous du chiffre de la région.

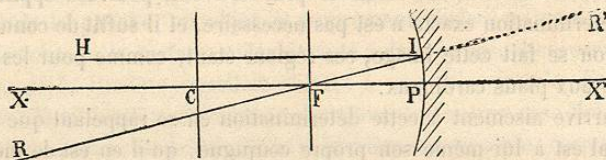
Quelques remarques utiles peuvent être faites d'après les tableaux :

On voit ainsi que, si on veut ne considérer que des objets réels,



effectifs, le miroir concave peut donner, suivant les circonstances, des images réelles (régions I et II) ou virtuelles agrandies (région III), mais

OBJETS	Position.....	I.....	II.....	III.....	IV.....
	Nature.....	Réels.....			Virtuels.....



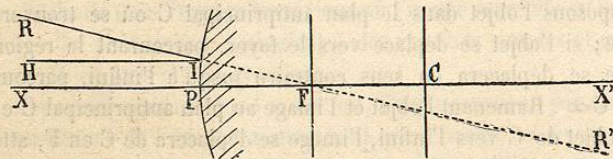
IMAGES	Position.....	II.....	I.....	IV.....	III.....
	Nature.....	Réelles.....			Virtuelles.....
	Sens.....	Renversés.....			Droites.....
	Grandeur.....	Agrandies.....	Diminuées.....		Agrandies.....

Fig. 164.

que le miroir convexe ne donne que des images virtuelles (région I) diminuées.

D'autre part, on peut donner une règle absolument générale pour le sens de l'image : l'image est droite si elle est de nature opposée à l'objet,

OBJETS	Position.....	I.....	II.....	III.....	IV.....
	Nature.....	Réels.....			Virtuels.....



IMAGES	Position.....	II.....	I.....	IV.....	III.....
	Nature.....	Réelles.....			Virtuelles.....
	Sens.....	Droites.....			Renversés.....
	Grandeur.....	Agrandies.....	Diminuées.....		Agrandies.....

Fig. 165.

elle est renversée si elle est de même nature que l'objet (la nature s'entend comme nous l'avons dit de la réalité ou de la virtualité).

ART. III. — RÉFRACTION

382. Réfraction simple. Double réfraction. — La réfraction est, comme nous l'avons dit, le phénomène qui se produit lorsqu'un faisceau lumineux passe d'un milieu dans un autre, phénomène qui consiste ordinairement dans un changement de forme et de direction que subit le faisceau.

Le phénomène de la réfraction ne se manifeste pas toujours de cette manière et quelquefois il est moins simple en ce que, à un faisceau incident, correspondent, non pas seulement un, mais deux faisceaux réfractés : c'est le phénomène de la double réfraction. Il se produit

dans le cas où le second milieu n'est pas isotrope (28), c'est-à-dire principalement dans le cas où ce milieu appartient à un système cristallin autre que le système cubique. Nous examinerons ultérieurement ce cas, et nous nous occuperons d'abord de la réfraction simple qui se produit quand le second milieu est isotrope, lorsqu'il est amorphe ou qu'il est constitué par une substance cristallisée dans le système cubique.

D'autre part, nous étudierons d'abord seulement le cas où les faisceaux considérés sont constitués par de la lumière simple, monochromatique : nous préciserons plus tard ce que signifie cette restriction et nous nous bornerons à dire actuellement qu'on peut obtenir de semblable lumière, soit en prenant comme source lumineuse la flamme de l'alcool salé, soit en plaçant sur le trajet d'un faisceau de lumière blanche un verre coloré en rouge par l'oxyde de cuivre, verre fréquemment employé dans un grand nombre de cas.

383. Lois élémentaires de la réfraction. — On ne peut pas déterminer par l'expérience les lois élémentaires de la réfraction pour les

raisons que nous avons indiquées en parlant de la réflexion ; mais de la même façon, on peut déduire ces lois de l'étude de la réfraction d'un faisceau parallèle sur une surface plane. On reconnaît que, dans ce cas, le faisceau réfracté est aussi parallèle : tous les rayons subissent donc la même modification de direction, modification qui est celle que subit le faisceau lui-même.

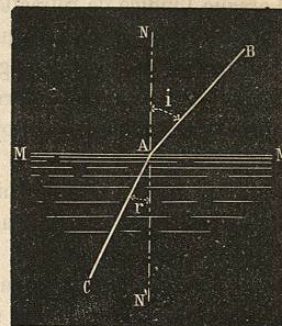


Fig. 166.

Le rayon incident BA (fig. 166) est défini par l'angle d'incidence  $i$  comme nous l'avons dit pour la réflexion ; le rayon réfracté AC est défini, d'une manière analogue, par l'angle  $r$  qu'il fait avec la normale, *angle de réfraction*.

Les lois élémentaires de la réfraction sont au nombre de trois :

1<sup>re</sup> Loi : Le rayon réfracté est dans le plan qui contient le rayon incident et la normale (plan d'incidence) ;

2<sup>e</sup> Loi : Pour deux milieux déterminés, le rapport du sinus de l'angle d'incidence au sinus de l'angle de réfraction est indépendant de l'angle d'incidence<sup>1</sup> ;

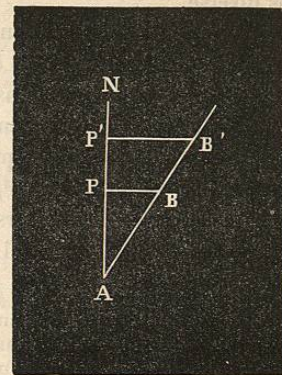


Fig. 167.

1. Rappelons qu'on appelle sinus de l'angle NAB' (fig. 167) le rapport  $\frac{BP}{AB}$