

### CHAPITRE III

#### REFRACTION DE LA LUMIÈRE

##### I. — PRINCIPES GÉNÉRAUX

766. **Lois de la réfraction.** — On appelle *réfraction*, la déviation que subissent les rayons lumineux lorsque, rencontrant obliquement la surface de séparation de deux milieux transparents, ils passent de l'un de ces milieux dans l'autre. — Ainsi, lorsqu'un rayon lumineux  $SI$  (fig. 598) rencontre obliquement la surface d'une nappe d'eau  $AB$ , ce rayon, au lieu de suivre sa direction primitive  $IS'$ , prend une direction différente  $IR$ .

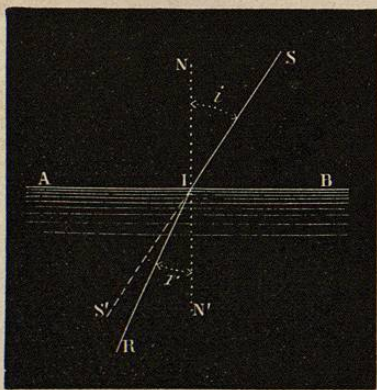


Fig. 598.

avec la normale. — Lorsque l'angle de réfraction est *plus petit* que l'angle d'incidence, on dit que le second milieu est *plus réfringent* que le premier; dans le cas contraire, on dit qu'il est *moins réfringent*. — En général, de deux corps transparents, le *plus dense* est aussi le plus réfringent; cette règle offre cependant quelques exceptions.

La réfraction est soumise aux deux lois suivantes, connues sous le nom de lois de Descartes :

1° Le rayon réfracté reste dans le plan d'incidence.

2° Le rapport du sinus de l'angle d'incidence au sinus de l'angle de réfraction est constant pour les mêmes milieux, quelle que soit la valeur de l'angle d'incidence.

Pour vérifier ces lois on peut employer l'appareil de Silbermann, déjà décrit (737), en y adaptant, au lieu du miroir  $A$ , une auge cylindrique, limitée par deux plans de verre (fig. 599); on verse de l'eau jusqu'à la hauteur du centre  $C$  du cercle, et, au moyen du petit miroir  $m$ , on fait arriver un faisceau de lumière solaire qui, passant par l'ouverture  $i$ , vienne tomber à la surface de l'eau en  $C$ . — Nous ferons remarquer que le faisceau lumineux, après s'être réfracté en pénétrant de l'air dans l'eau, se propage dans l'eau suivant un rayon du cercle; dès lors, il se présente, pour sortir de l'eau, suivant un angle d'incidence nul: il ne subit donc pas de nouvelle déviation à l'émergence. L'appareil permet donc d'étudier la déviation produite uniquement par le premier passage, de l'air dans l'eau.

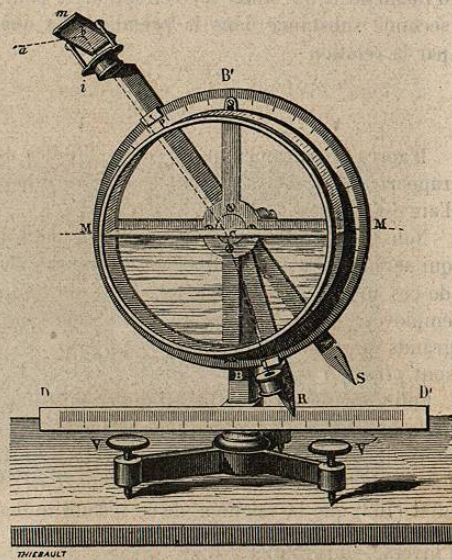


Fig. 599. — Appareil de Silbermann, pour les lois de la réfraction.

On constate d'abord qu'il est toujours possible de donner à l'alidade  $R$  une position telle, que le faisceau réfracté vienne passer par l'ouverture  $i$ ; ce faisceau reste donc dans le plan d'incidence, qui est parallèle au plan du cercle. — Pour mesurer les sinus des angles d'incidence et de réfraction, on fait mouvoir la règle horizontale  $DD'$  le long du support vertical de l'appareil, de façon qu'elle vienne toucher l'extrémité  $S$  de l'alidade qui porte l'ouverture  $i$ : la longueur comptée sur cette règle, entre  $S$  et le diamètre vertical  $BB'$ , mesure le sinus de l'angle  $SCB$ , dans le cercle de rayon  $CS$ ; c'est le *sinus de l'angle d'incidence*, puisque l'angle  $SCB$  est égal à  $iCB'$ , comme opposé par le sommet. On amène ensuite la règle en contact avec l'extrémité  $R$  de l'autre alidade, dont la longueur  $CR$  est égale à  $CS$ , et l'on mesure ainsi le sinus de l'angle de réfraction. On trouve que le rapport de ces deux

sinus est sensiblement  $\frac{1}{3}$ . — On répète l'expérience en donnant une autre valeur à l'angle d'incidence : on constate que le rapport des deux sinus reste toujours égal à  $\frac{1}{3}$ .

767. **Indices de réfraction.** — On appelle *indice de réfraction* d'une substance, par rapport à une autre, le rapport constant  $n$  du sinus d'incidence  $i$  au sinus de réfraction  $r$ , pour un rayon passant de la seconde substance dans la première. La quantité  $n$  est donc définie par la relation

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n.$$

D'après l'expérience qui précède, l'indice de réfraction de l'eau par rapport à l'air est  $\frac{1}{3}$ . — Pour le verre ordinaire, l'indice par rapport à l'air est environ  $\frac{3}{2}$ , etc.

Nous indiquerons plus loin (783) le principe de l'une des méthodes qui servent à la détermination des indices de réfraction, et les valeurs de ces indices pour les corps solides ou liquides le plus fréquemment employés. — Ces indices sont tous représentés par des nombres plus grands que l'unité; c'est-à-dire que tous les corps solides ou liquides sont *plus réfringents que l'air* (\*).

Enfin, quand on connaîtra l'indice de réfraction  $n$  relatif au passage de la lumière de l'air dans une substance déterminée, on connaîtra, sans nouvelle expérience, l'indice de réfraction  $n'$  pour le passage de la lumière de cette même substance dans l'air. Nous verrons bientôt en effet (769) que la valeur  $n'$  de ce second indice s'obtiendra en prenant l'inverse  $\frac{1}{n}$  du premier.

768. **Construction géométrique d'Huyghens.** — La théorie des ondulations a conduit Huyghens à la construction géométrique suivante, qui donne la direction du rayon réfracté, quand on connaît l'indice de réfraction  $n$  du second milieu par rapport au premier.

Soit AB (fig. 600) la surface de séparation, que nous supposons plane; soient SI le rayon incident, et NV la normale. Prenons une unité de longueur quelconque et, du point I comme centre, décrivons, dans le plan d'incidence et à l'intérieur du second milieu : 1° une demi-circonférence C, avec un rayon égal à 1; 2° une demi-circonférence D, avec un rayon égal à  $\frac{1}{n}$ . Par le point S', où le prolongement de SI rencontre la première, menons une tangente S'T; par le point M, où cette droite rencontre la surface de séparation AB, menons une tangente à

(\*) Lorsqu'on répète ces mêmes déterminations en faisant en sorte que la lumière passe, non plus de l'air dans l'eau ou dans le verre, mais *du vide* dans ces mêmes milieux, on trouve des nombres qui diffèrent peu des précédents, et qu'on peut appeler indices de réfraction par rapport au vide, ou *indices absolus*.

la seconde, soit R le point de contact, et joignons IR : la droite IR représentera la direction du rayon réfracté. — En effet, si l'on désigne par  $r$  l'angle NIR, on a  $ITS' = i$ ,  $ITR = r$ , et les deux triangles TIS', TIR donnent

$$TI = \frac{1}{\sin i} = \frac{\left(\frac{1}{n}\right)}{\sin r}; \quad \text{d'où l'on tire} \quad \sin r = \frac{\sin i}{n};$$

l'angle  $r$ , déterminé par cette construction, est donc bien l'angle de réfraction, et la direction IR est bien celle du rayon réfracté.

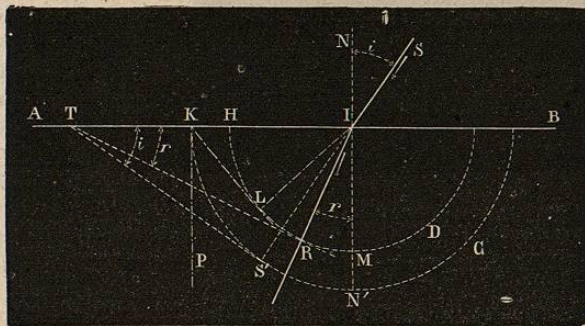


Fig. 600. — Construction d'Huyghens.

Cette construction d'Huyghens montre immédiatement comment varie l'angle S'IR, qui représente la *dévi*ation du rayon réfracté, quand on fait varier l'angle d'incidence  $i$ . — En effet, si l'on fait varier  $i$  de zéro à  $90^\circ$ , le point S' se déplace, sur l'arc NK, depuis N' jusqu'à K; par suite, le point R se déplace, sur l'arc MH, depuis M jusqu'au point de contact L de la tangente KL; donc l'angle de réfraction  $r$  varie de zéro jusqu'à la valeur IKL. (On voit que cet angle, que nous appellerons l'*angle limite*, a pour sinus  $\frac{1}{n}$ ). — Or l'angle de *dévi*ation S'IR, ou  $(i - r)$ , pour une valeur quelconque de  $i$ , est toujours égal à l'angle S'TR des deux tangentes : quand le sommet T de cet angle se déplace sur IA, depuis l'infini jusqu'au point K, cet angle va constamment en croissant depuis zéro jusqu'à la valeur LKP. Donc, quand l'angle d'incidence augmente, la *dévi*ation va constamment en croissant, depuis zéro jusqu'à une valeur déterminée. (On voit que cette valeur limite LKP de l'angle de *dévi*ation a son sinus égal à  $\cos IKL$ , ou à  $\sqrt{1 - \frac{1}{n^2}}$ ).

769. **Réfraction par une lame à faces parallèles.** — **Principe du retour inverse des rayons.** — Lorsqu'on place une lame

de verre à faces parallèles entre l'œil et un objet éloigné, comme une étoile, l'observation montre que la direction dans laquelle on voit cet objet n'est pas changée. Il en résulte que chaque rayon émergent  $IS'$

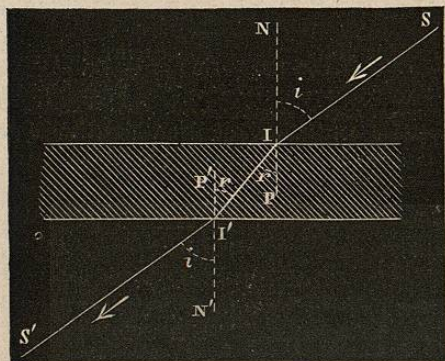


Fig. 601. — Réfraction par une lame à faces parallèles.

(fig. 601) est parallèle au rayon incident  $SI$  dont il provient (\*). — Dès lors, l'angle d'émergence  $N'I'S'$  est égal à l'angle d'incidence  $NIS$  : soit  $i$  la valeur commune de ces deux angles. Soit  $r$  la valeur commune des angles  $PII'$  et  $P'I$ , égaux comme alternes-internes. Soient  $n$  l'indice de réfraction du verre par rapport à l'air, et  $n'$  l'indice de l'air par rapport au verre. Le passage de l'air dans le verre, en  $I$ , donne

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

le passage du verre dans l'air, en  $I'$ , donne

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

De ces deux équations, on tire

$$n' = \frac{1}{n},$$

c'est-à-dire que l'indice de l'air par rapport au verre est l'inverse de l'indice du verre par rapport à l'air.

Il résulte de là que, si un rayon, passant de l'air dans le verre, se réfracte suivant une certaine direction, un rayon qui suivrait cette même direction en sens inverse se réfractera, en passant du verre dans l'air, suivant la direction du rayon incident primitif. — Ce résultat n'est qu'un cas particulier du principe qui est connu sous le nom de retour inverse des rayons lumineux. Ce principe peut s'énoncer de la manière suivante : En général, si, en traversant des milieux déterminés, un rayon lumineux suit une certaine route, un rayon se propageant en sens inverse suit la même route que le premier.

(\*) C'est ce qu'on peut vérifier encore, d'une manière grossière, en faisant passer, dans une chambre obscure, un faisceau de lumière solaire au travers d'une lame à faces parallèles, et comparant la direction du faisceau émergent à la direction du faisceau incident.

770. Cas où la lumière passe d'un milieu dans un autre milieu plus réfringent. — Lorsque des rayons lumineux se présentent pour passer d'un milieu dans un autre milieu plus réfringent, par exemple de l'air dans un corps solide ou liquide, l'expérience montre qu'il y a toujours des rayons transmis, quel que soit l'angle d'incidence. — La loi de Descartes permet d'ailleurs toujours de déterminer la direction des rayons réfractés.

Soit, par exemple, un rayon lumineux  $NI$  (fig. 602), tombant sur la surface de l'eau dans la direction même de la normale. On a, pour ce rayon,  $i=0$ ; par suite,  $r=0$ , c'est-à-dire que le rayon pénètre dans l'eau sans déviation, suivant  $IN$ . — Pour un rayon quelconque  $SI$ , tombant au même point  $I$ , la direction du rayon réfracté  $IR$  est donnée par la loi de Descartes. A mesure que l'angle d'incidence  $SIN$  augmente, l'angle de déviation va en augmentant : c'est ce

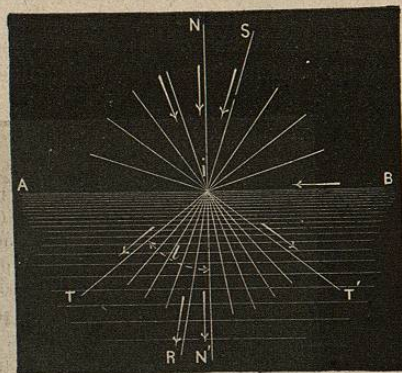


Fig. 602. — Passage de la lumière, de l'air dans l'eau.

qu'il est facile de vérifier en calculant la valeur de cet angle, et c'est ce que montre d'ailleurs la construction d'Huyghens (768). Enfin, pour un rayon qui tomberait au point  $I$  dans une direction rasante  $BI$ , on aurait  $i=90^\circ$ , c'est-à-dire  $\sin i=1$ ; par suite,  $\sin r = \frac{1}{n}$  ou, dans le cas actuel,  $\sin r = \frac{3}{4}$ , ce qui donne pour la valeur de  $r$  environ 48 degrés. On obtient ainsi la direction du rayon réfracté  $IT$ , correspondant au rayon incident  $BI$ , et la déviation est représentée par  $AIT$ .

Dès lors, pour tous les rayons incidents qui tombent sur la surface de l'eau au point  $I$ , de toute la région située au-dessus de cette surface, les rayons réfractés sont compris à l'intérieur du cône  $TIT'$ , qu'on obtiendrait en faisant tourner l'angle  $TIN'$  autour de la normale  $IN'$ . — Nous venons de voir que, pour l'eau, la valeur de cet angle est d'environ 48 degrés. Pour une substance quelconque, c'est toujours l'angle dont le sinus est égal à  $\frac{1}{n}$ .

Mais il est essentiel de remarquer que les divers rayons réfractés ne conservent pas, en égale proportion, l'intensité lumineuse des rayons incidents. — En effet, nous avons vu (744) que, quand un rayon lu-

mineux tombe sur la surface d'un corps transparent, la proportion de lumière *réfléchie* augmente avec l'angle d'incidence. Par suite, la proportion de lumière réfractée diminue à mesure que l'angle d'incidence augmente. En d'autres termes, l'intensité lumineuse du rayon réfracté  $IN'$  (fig. 602) est presque égale à celle du rayon incident  $NI$ , tandis que l'intensité des rayons réfractés voisins de  $IT$  est presque nulle.

771. **Cas inverse. — Angle limite. — Réflexion totale.** — Considérons maintenant le cas inverse, où des rayons se présentent pour passer d'un milieu dans un autre milieu *moins réfringent*. — Nous allons voir que, dans certains cas, ce passage devient impossible.

Soit un point lumineux  $O$  (fig. 603), situé dans l'eau et émettant des

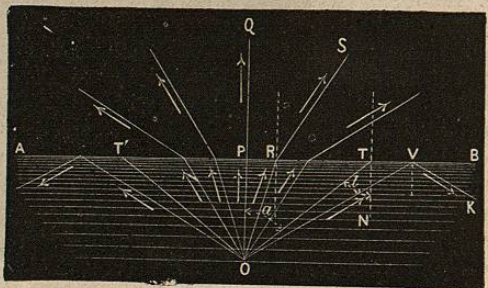


Fig. 603. — Passage de l'eau dans l'air. — Angle limite. — Réflexion totale.

rayons vers sa surface. — Le rayon  $OP$ , qui tombe dans une direction normale à la surface de l'eau, sort *sans déviation*, suivant  $PQ$ , et son intensité lumineuse est *sensiblement égale* à celle du rayon incident. — Un rayon  $OR$ , qui tombe sur la surface de l'eau suivant un angle d'incidence assez petit, sort de l'eau *en s'écartant de la normale*. Si l'on désigne toujours par  $n$  l'indice de réfraction de l'eau par rapport à l'air, l'indice de l'air par rapport à l'eau est  $\frac{1}{n}$ , et la direction  $RS$  du

rayon réfracté est donnée par la relation  $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{1}{n}$ , ou  $\sin r = n \sin i$ .

L'intensité lumineuse de ce rayon  $RS$  est moindre que celle du rayon incident  $OR$ , une portion de la lumière incidente étant réfléchie vers la partie inférieure. — Si maintenant on considère des rayons incidents qui s'écartent de plus en plus de la direction  $OP$ , la relation  $\sin r = n \sin i$  ne peut fournir de valeur réelle pour  $r$  que si la valeur de  $\sin i$  n'est pas supérieure à  $\frac{1}{n}$ , ou dans le cas actuel, si l'angle d'incidence  $i$  n'est pas supérieur à 48 degrés. Désignons en général par  $l$ , pour une sub-

stance quelconque, l'angle dont le sinus est égal à  $\frac{1}{n}$ ; la réfraction ne sera possible que pour les rayons dont l'angle d'incidence sera inférieur à cet *angle limite*.

L'expérience montre, en effet, que, pour des rayons s'écartant de plus en plus de la direction  $OP$ , la déviation devient de plus en plus grande, jusqu'à ce qu'on arrive à un rayon incident  $OT$  dont l'angle d'incidence est égal à  $l$ , et qui sort de l'eau *en rasant la surface*, suivant  $TB$  (la relation précédente donne, pour ce rayon,  $\sin r = 1$ , ou  $r = 90^\circ$ ). L'intensité lumineuse de ce rayon émergent  $TB$  est d'ailleurs presque nulle, la plus grande partie de la lumière étant réfléchie. — Enfin, pour tout rayon incident  $OV$  tombant sous une incidence plus grande, il y a *réflexion totale*, c'est-à-dire que toute la lumière du rayon incident se retrouve dans le rayon réfléchi  $VK$ , et aucune partie de cette lumière ne sort du liquide.

Il en est ainsi pour tous les rayons émis par le point  $O$  en dehors du cône que l'on obtiendra en faisant tourner l'angle  $TOP$  autour de la normale  $OP$ . Cet angle  $TOP$ , ou  $a$ , est égal à l'angle d'incidence  $OTN$  ou  $l$ , puisque ces deux angles sont alternes-internes, par rapport aux parallèles  $OP$  et  $TN$  coupées par la sécance  $OT$ .

772. **Expérience fondée sur la réflexion totale.** — Mettons de

l'eau dans une vase de verre (fig. 604) et faisons flotter sur cette eau un disque de liège circulaire  $TT'$ , d'environ 3 centimètres de rayon, au-dessous duquel nous aurons adapté une épingle  $A$ , perpendiculaire à sa surface, et ayant une longueur d'environ 2 centimètres. En raison de ces dimensions, tout rayon lumineux émis par un point quelconque de l'épingle, et venant rencontrer la surface de l'eau en dehors du disque, fait avec la normale au point d'incidence un angle *plus grand*

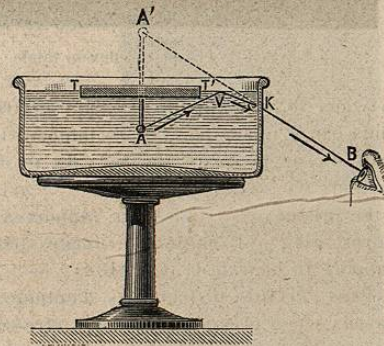


Fig. 604. — Expérience de la réflexion totale.

que l'angle limite, et éprouve, par suite, la *réflexion totale*. — On constate en effet que, quel que soit le point où l'on place l'œil au-dessus de la surface de l'eau, il est impossible d'apercevoir l'épingle. Au contraire, en plaçant l'œil en  $B$ , au-dessous de cette surface, on aperçoit une image de l'épingle, par réflexion. Cette image est seulement un peu allongée, en raison de la petite déviation qu'éprouvent les rayons lumineux en sortant de l'eau, en  $K$ , comme le montre la figure.

773. **Prismes à réflexion totale.** — C'est par ces mêmes principes que s'explique l'emploi des prismes dits à réflexion totale.

Les indices des diverses espèces de verre ayant toujours une valeur voisine de 1,5, l'angle limite est toujours voisin de  $41^\circ$ . Dès lors, soit

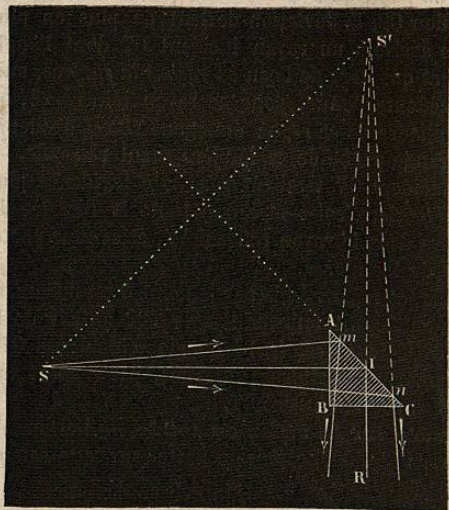


Fig. 605. — Prisme à réflexion totale.

un prisme triangulaire de verre, à base rectangle et isocèle ABC (fig. 605); soit S un point lumineux, situé à une distance telle que tous les rayons émis par ce point sur l'une des faces AB de l'angle droit s'écartent peu de la direction normale à cette face. Le rayon normal SI pénètre sans déviation par la face AB; il éprouve la réflexion totale sur la face hypoténuse AC, qu'il rencontre sous un angle de  $45^\circ$ ; enfin, il sort normalement

à la face BC, suivant IR. — Quant aux rayons voisins Sm, Sn, qui sont émis par le même point S, ils tombent toujours sur la face hypoténuse sous un angle voisin de  $45^\circ$ ; ils se comportent donc de la même manière (\*).

Le prisme agit donc, par rapport à tous ces rayons, comme un miroir plan : il donne une image virtuelle S', symétrique de S par rapport au plan de la face AB.

Dans certains instruments d'optique, lorsqu'un faisceau formé de rayons à peu près parallèles doit être réfléchi dans une direction perpendiculaire à sa direction primitive, il est avantageux d'employer un prisme à réflexion totale, plutôt qu'un miroir métallique dont la surface éprouve, avec le temps, une altération toujours assez rapide.

774. **Déplacement apparent des objets vus dans l'eau.** — Lorsque l'œil est placé au-dessus de la surface d'une eau tranquille, dans une position qui lui permette de recevoir des rayons lumineux

(\*) Pour construire la direction des rayons émergents qui correspondent à Sm et Sn, on peut ne pas tenir compte des deux déviations produites par les faces AB et BC, ces deux déviations étant toujours égales et de sens contraires.

émis par des points placés dans l'eau, il voit en général ces points, non pas dans leur position réelle, mais dans une position plus voisine de la surface libre du liquide.

Mettons, par exemple, une pièce de monnaie m sur le fond d'un vase à parois opaques V (fig. 606); le vase étant d'abord vide, plaçons notre œil en un point O, tel qu'il aperçoive la pièce à moitié cachée par le

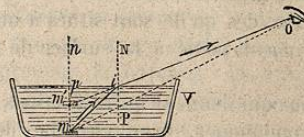


Fig. 606. — Déplacement apparent des objets vus dans l'eau.

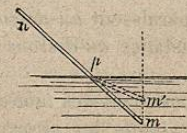


Fig. 607. — Apparence brisée d'un bâton pénétrant dans l'eau.

bord du vase. Lorsqu'on viendra à verser de l'eau dans le vase, la pièce de monnaie deviendra visible tout entière : elle paraîtra relevée, ainsi que le fond du vase qui la supporte. — Dans cette expérience, en effet, les rayons qui parviennent à l'œil ne lui arrivent plus en ligne droite, suivant  $mO$ . L'œil reçoit des rayons, tels que  $mi$ , qui ont éprouvé en  $i$  une réfraction les écartant de la normale : il voit alors la pièce en un point  $m'$  du prolongement de  $Oi$ , c'est-à-dire qu'il la voit relevée vers la surface de l'eau (\*).

De même un bâton  $mn$  (fig. 607), en partie plongé dans l'eau, paraît brisé au point  $p$ , où il pénètre dans le liquide : la partie plongée  $pm$  apparaît en  $pm'$ , c'est-à-dire relevée vers la surface.

775. **Influence des réfractons produites par l'atmosphère, dans l'observation des astres.** — Les rayons émis par les astres éprouvent, en traversant les couches de notre atmosphère, dont les densités sont progressivement croissantes, des réfractons qui nous font voir ces astres dans des positions plus voisines de notre zénith qu'ils ne le sont en réalité. En effet, en supposant ces couches limitées par des surfaces sphériques dont le centre

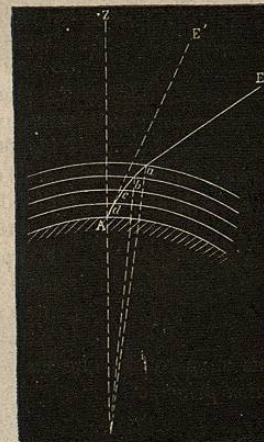


Fig. 608. Réfractons atmosphériques.

(\*) Si les rayons émergents qui parviennent à l'œil ne sont pas trop inclinés sur la surface du liquide, ce point  $m'$  est celui où le prolongement de  $Oi$  rencontre le rayon lumineux  $mp$  qui tombe normalement à la surface, rayon qui sort sans déviation.