sur le miroir se réfléchissent en un faisceau rigoureusement parallèle à l'axe Les miroirs qui possèdent cette propriété sont appelés *aplanétiques*.

436. **Construction et emploi des miroirs aplanétiques.** — Dans ces conditions la lumière ainsi réfléchie conserve la même intensité jusqu'à une grande distance de la source; car c'est surtout la divergence des rayons qui en affaiblit l'intensité. Aussi, bien que les miroirs paraboliques soient plus difficiles à construire et plus coûteux que les miroirs sphériques, ils leur sont préférés comme *objectifs* de *télescopes*.

1° Les premiers miroirs aplanétiques pour télescopes furent construits en 1777 par l'opticien anglais Mudge. C'étaient tout simplement des miroirs sphériques en métal, qu'il polissait ensuite de manière à enlever un peu plus de matière au centre que sur les bords. On comprend en effet qu'en augmentant progressivement le rayon de courbure depuis le centre jusqu'au bord, on puisse annuler la distance entre le foyer des rayons marginaux et celui des rayons centraux. C'est la même méthode empirique qui servit à lord Ross pour la construction de l'objectif aplanétique de son grand télescope. Cette méthode avait le grave inconvénient d'être très longue, très délicate, et d'exiger un grand nombre d'essais et de tâtonnements. Elle a été considérablement perfectionnée, grâce à la découverte de l'argenture chimique du verre par Stemheil. Cela a permis de substituer au bronze le verre argenté, qui est moins lourd, moins coûteux, plus facile à réparer et susceptible d'un poli plus parfait. On construit d'abord des miroirs sphériques, on les rend ensuite aplanétiques en travaillant les différentes régions par la méthode dite des *retouches locales*, de Foucault : on sait à chaque instant de combien l'on s'écarte de la forme parabolique et dans quel sens, ce qui supprime les tâtonnements et les lenteurs de l'ancienne méthode.

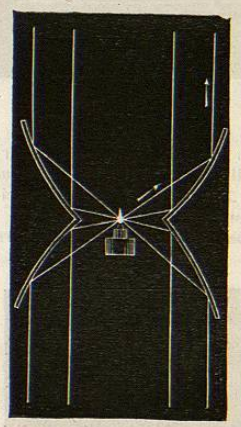

Fig. 485.

2° On emploie encore les miroirs paraboliques comme réflecteurs pour les lampes qu'on place sur les voitures publiques, ainsi que sur les trains de chemins de fer. Ces sortes de réflecteurs ont aussi longtemps servi pour les phares, mais on emploie de préférence aujourd'hui des *systèmes réfringents* (lentilles de Fresnel).

3° 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 485, en sorte que leursdeux foyers coïncident, on obtient un double réflecteur 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 dans toute leur étendue.

437. **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.

Héliostat. — 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 apparent du soleil. Ce résultat s'obtient à l'aide d'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*.

Goniomètre. — 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 concaves sphériques ou paraboliques ont aussi reçu de nombreuses applications. On s'en sert comme miroirs grossissants : tels sont les miroirs à barbe. On les a utilisés comme miroirs ardents. Enfin, nous venons de voir l'usage qu'on en fait soit comme *objectifs* dans les télescopes, soit comme réflecteurs pour porter au loin les rayons d'une source lumineuse placée à leur foyer principal.

CHAPITRE IV

DIOPTRIQUE

—

LOIS DE LA RÉFRACTION SIMPLE.

438. **Définitions.** — La *réfraction* est une déviation qu'éprouvent les rayons lumineux lorsqu'ils traversent *obliquement* la surface de séparation de deux milieux transparents, tels que l'air et l'eau (fig. 486, I). Si les rayons tombent perpendiculairement à cette surface, ils ne subissent aucune déviation, ils continuent à se propager en ligne droite (fig. 486, II).

Soit SO un *rayon incident* et AO la normale en O à la surface de séparation des deux milieux. Prenons pour plan de la figure 487 le plan d'incidence SOA : la surface réfringente est représentée par la droite *mn*. On nomme *rayon réfracté* la direction OH que prend la lumière dans le second milieu; les angles SOA et HOB, que forment ces rayons avec la normale AB, sont nommés, l'un *angle d'incidence*, et l'autre *angle de réfraction*.

La lumière qui se présente pour passer d'un milieu dans un autre ne pénètre jamais en totalité dans celui-ci : une partie se réfléchit à la surface de séparation, une autre partie s'y diffuse, et le reste seulement pénètre dans le second milieu. La réfraction d'un faisceau lumineux est donc toujours accompagnée d'une perte plus ou moins grande de lumière.

Dans les milieux non cristallisés, comme l'air, les liquides, le verre ordinaire, le rayon lumineux, *simple* à l'incidence, reste encore *simple* après la réfraction; mais dans certains corps cristallisés, comme le spath d'Islande ou le gypse, le rayon incident

donne naissance à *deux rayons réfractés*. Le premier phénomène

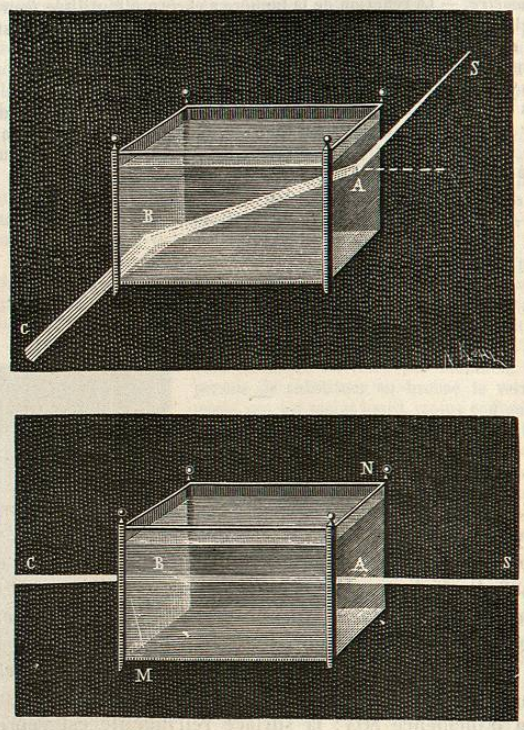

Fig. 486.

constitue la *réfraction simple;* le second, la *double réfraction.* Les milieux qui ne donnent qu'un seul rayon réfracté sont appelés *monoréfringents;* les autres sont dits *biréfringents.*

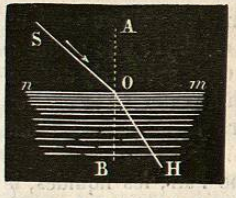

Fig. 487.

439. **Lois de la réfraction simple.** — Tout rayon lumineux qui passe d'un milieu transparent dans un autre est réfracté d'après les deux lois suivantes :

1° *Le rayon incident et le rayon réfracté sont dans un même plan perpendiculaire à la surface réfringente*

2° (Loi de Descartes). — *Quelle que soit l'obliquité du rayon incident,*

le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction sont dans un rapport constant.

Ce nombre s'appelle *indice de réfraction* du deuxième milieu par rapport au premier [1].

Vérification expérimentale. — On peut vérifier directement ces lois à l'aide d'un appareil spécial. Il consiste essentiellement en un cercle en cuivre, gradué, disposé verticalement sur un trépied à vis calantes (fig. 489) et muni de deux alidades en cuivre MF et OK. Ces deux alidades peuvent se mouvoir sur la face postérieure du cercle, en tournant sur un tourillon central, et peuvent parcourir librement toute la graduation, laquelle est tracée de part et d'autre du point I, et va de 0° à 90°. Elles portent deux petits tubes, semblables au tube *e*, dont les axes, dirigés rigoureusement vers le centre, servent de route aux rayons lumineux, incidents ou réfractés. Sur l'une des alidades est monté un miroir M, qu'on incline à volonté de manière à envoyer le rayon incident dans la direction voulue.

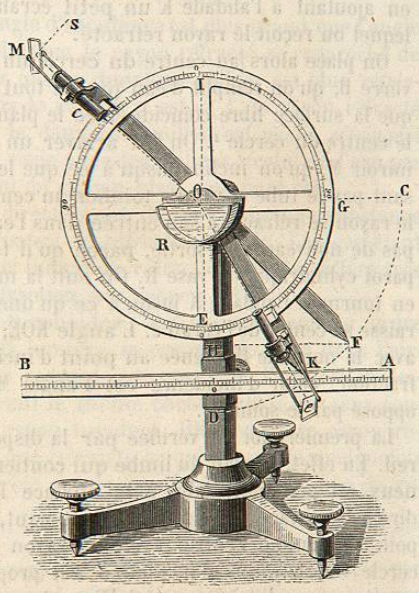

Fig. 489.

1. Pour interpréter ces lois, rappelons d'abord qu'un angle étant donné, si l'on décrit de son sommet, comme centre, avec un rayon égal à l'unité, un arc AB, qui le mesure, on nomme *sinus* de l'angle ACB, ou de l'arc AB (fig. 488), la perpendiculaire BP abaissée d'une extrémité de l'arc sur le rayon qui passe par l'autre extrémité. L'angle BCA croissant de 0 à 90 degrés, son sinus croît de 0 à 1; puis, l'angle continuant à croître jusqu'à 180 degrés, le sinus décroît de 1 à 0. Ajoutons qu'on a calculé des tables, connues sous le nom de *tables des sinus*, qui font connaître le sinus d'un angle quand celui-ci est connu en degrés, et réciproquement.

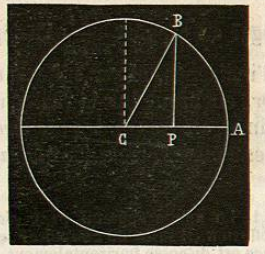

Fig 488.

Opération. — Pour vérifier les lois de la réfraction, on commence par fixer sur le pied de l'appareil une règle horizontale AB, divisée en millimètres. Cette règle, qu'on abaisse ou qu'on élève à volonté, donne des longueurs proportionnelles aux sinus des angles d'incidence et de réfraction. Enfin, on facilite l'expérience en ajoutant à l'alidade K un petit écran de verre dépoli *e*, sur lequel on reçoit le rayon réfracté.

On place alors au centre du cercle un vase hémicylindrique en verre B, qu'on remplit d'eau (ou de tout autre liquide) jusqu'à ce que la surface libre coïncide avec le plan horizontal qui contient le centre du cercle [1]. On fait arriver un rayon lumineux S sur le miroir M, qu'on incline jusqu'à ce que le rayon réfléchi MO, passant par le tube *c*, vienne tomber au centre du cercle gradué. Là le rayon se réfracte à son entrée dans l'eau ; mais il ne se réfracte pas de nouveau à la sortie, parce qu'il tombe normalement à la paroi cylindrique du vase R. On suit la marche du rayon réfracté, en tournant l'alidade K jusqu'à ce qu'une image lumineuse apparaisse au centre de l'écran *e*. L'angle KOE, que fait alors l'alidade K avec la normale IE menée au point d'incidence, est l'angle de réfraction : celui d'incidence est l'angle MOI, égal à FOE, comme opposé par le sommet.

La première loi est vérifiée par la disposition même de l'appareil. En effet, le plan du limbe qui contient les deux rayons lumineux est perpendiculaire à la surface libre du liquide, c'est-à-dire à la surface réfringente. Maintenant, si l'on imagine que, du point O comme centre, avec le rayon OK, on décrive l'arc de cercle CD, le sinus d'incidence est proportionnel à la droite FH menée perpendiculairement à IE prolongée, et le sinus de réfraction à la perpendiculaire abaissée de l'extrémité K sur le prolongement de la même droite IE. On évalue ces deux grandeurs à l'aide de la règle AB : telle qu'on l'a placée dans le dessin, elle mesure le sinus de l'angle de réfraction ; en la remontant jusqu'à F, on mesurera de même FH. Le rapport de ces deux mesures est égal au rapport $\frac{\sin i}{\sin r}$. En déplaçant l'alidade M, on fait varier l'angle d'incidence, et par suite l'angle de réfraction qui lui correspond. Or, en lisant sur la règle successivement les longueurs des deux sinus, on trouve des nombres qui sont variables avec la position des alidades, mais dont *le rapport est constant.*

1. Le même appareil peut servir à la vérification directe des lois de la réflexion. Il suffit de remplacer le vase d'eau par un miroir plan, dont la surface est disposée horizontalement dans le plan horizontal du centre. On supprime alors la règle graduée AB, qui est inutile.

440. Indice de réfraction, indice de retour. — Nous avons dit que ce rapport constant est l'*indice de réfraction* du deuxième milieu par rapport au premier. Soit n cet indice, et i et r les angles d'incidence et de réfraction, on a $\frac{\sin i}{\sin r} = n$.

Lorsque n est > 1, l'angle d'incidence est plus grand que l'angle de réfraction ; il en résulte que le rayon réfracté se rapproche de la normale : on dit alors que le deuxième milieu est plus *réfringent* que le premier. Dans le cas où n est < 1, le rayon réfracté s'écarte de la normale : le deuxième milieu est *moins réfringent* que le premier. L'indice varie avec les milieux : celui de l'eau par rapport à l'air est $\frac{4}{3}$; celui du crown-glass ordinaire est $\frac{3}{2}$.

Si la lumière passait directement du vide dans une substance réfringente, on aurait l'*indice de réfraction absolu.* Les gaz étant très peu réfringents, leur indice de réfraction absolu diffère très peu de leur indice de réfraction par rapport à l'air.

Réciproquement, si l'on considère les milieux dans un ordre inverse, c'est-à-dire si la lumière se propage de l'eau dans l'air, ou du verre dans l'air, on constate, au moyen de l'appareil ci-dessus, que les rayons suivent le même chemin, mais en sens contraire : KO devenant le rayon incident, OM devient le rayon réfracté. C'est dans ce fait que consiste ce qu'on appelle quelquefois le *principe du retour inverse des rayons lumineux.* L'indice de réfraction, qui était d'abord n, est donc actuellement $\frac{1}{n}$: par exemple, l'indice de l'air par rapport à l'eau est $\frac{3}{4}$, et celui de l'air par rapport au verre $\frac{3}{2}$. En général, si l'indice d'un milieu quelconque relatif à l'air est n, l'*indice de retour* est $\frac{1}{n}$.

441. **Phénomènes dus à la réfraction.** — Plusieurs phénomènes naturels très connus sont des effets de la réfraction simple. Nous allons en citer quelques-uns.

1° *Relèvement des objets immergés.* — Par suite de la réfraction, les corps plongés dans l'eau, ou dans tout autre milieu plus réfringent que l'air, paraissent *rapprochés* de la surface de séparation ; ils en paraîtraient, au contraire *écartés*, s'ils étaient immergés dans un milieu moins réfringent.

Soit, par exemple, un objet L plongé dans une masse d'eau (fig. 490). En passant de ce liquide dans l'air, les rayons LB, LA,... s'écartent de la normale au point d'incidence et prennent les directions AC, BD,... dont les prolongements concourent sensiblement en un point L' situé sur la verticale LK. L'œil qui reçoit ces rayons voit donc l'objet L relevé en L'. Plus les rayons AC, BD,... sont réfractés, plus l'objet paraît relevé. C'est ainsi que le fond d'un vase plein d'eau, ou bien le lit d'une rivière, paraît plus ou moins relevé.

2° *Bâton brisé.* — Par le même effet, un bâton plongé obliquement dans l'eau *semble* brisé. La figure 491 montre la marche des rayons.

3° *Réfraction atmosphérique.* — C'est encore par un effet de réfraction que les astres nous paraissent relevés au-dessus de l'horizon. En effet, les couches de l'atmosphère augmentent de densité en se rapprochant du sol; or nous verrons plus loin que, pour un même gaz, l'indice de réfraction croît avec la

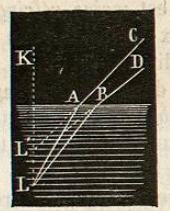

Fig. 490.

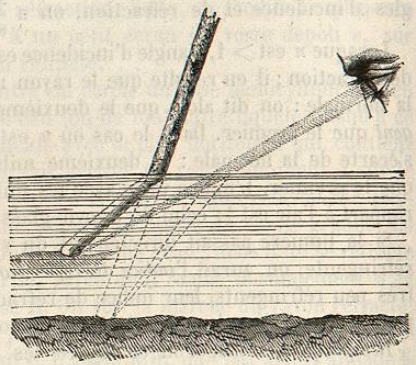

Fig. 491.

densité; il en résulte qu'en entrant dans l'atmosphère et en s'y propageant les rayons lumineux se brisent (fig. 492), en décrivant une courbe qui arrive jusqu'à l'œil; c'est donc suivant la tangente à cette courbe que nous voyons l'astre en S' au lieu de le voir en S.

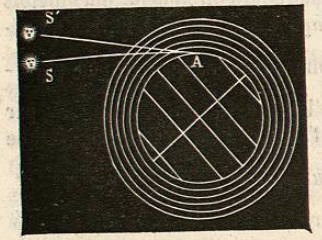

Fig. 492.

L'effet est d'autant plus marqué que l'astre est plus voisin de l'horizon. Dans nos climats, la réfraction atmosphérique relève les astres d'un peu plus d'un demi-degré (environ 34'). Comme le Soleil et la Lune ont des diamètres apparents moindres que 34', leurs disques apparaissent tout entiers — en mer, où rien ne les masque — avant même que leur sommet ait émergé au-dessus de l'horizon. La journée se trouve donc avancée au lever, et allongée au coucher du soleil, par suite de la réfraction atmosphérique.

442. **Angle limite. — Phénomène de la réflexion totale.** — Quand un rayon lumineux passe d'un milieu dans un autre moins réfringent, par exemple de l'eau dans l'air, on a vu que l'angle de réfraction est alors plus grand que l'angle d'incidence. Il suit de là que, lorsque la lumière se propage dans une masse d'eau, de S en O (fig. 493), il y a toujours une valeur de l'angle d'incidence SOB pour laquelle l'angle de réfraction AOR devient égal à un angle droit : le rayon réfracté OR sort alors sous une incidence *rasante*, c'est-à-dire parallèlement à la surface de l'eau.

Cet angle SOB se nomme l'*angle limite*, parce que pour tout angle d'incidence plus grand, tel que POB, le rayon incident PO ne peut donner naissance à aucun rayon réfracté. En effet, l'angle AOR augmentant avec SOB, le rayon OR se trouve porté en OQ; c'est-à-dire qu'il n'y a plus de réfraction au point O, mais une réflexion *intérieure*. On la nomme *réflexion totale*, parce que la lumière incidente est alors réfléchie *en totalité*.

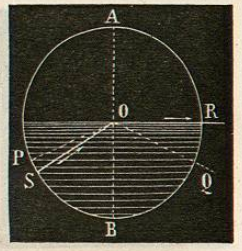

Fig. 493.

De l'eau à l'air, l'angle limite est de 48° 35'; du verre à l'air, il est de 41° 48'. Si l'on suppose un point lumineux O placé dans l'un de ces milieux plus réfringents que l'air (fig. 494), le cône de rayons lumineux ayant pour angle au sommet le double de l'angle limite, divise l'espace en deux régions : 1° dans l'intérieur du cône, tous les rayons qui tombent sur la surface de séparation émergent dans

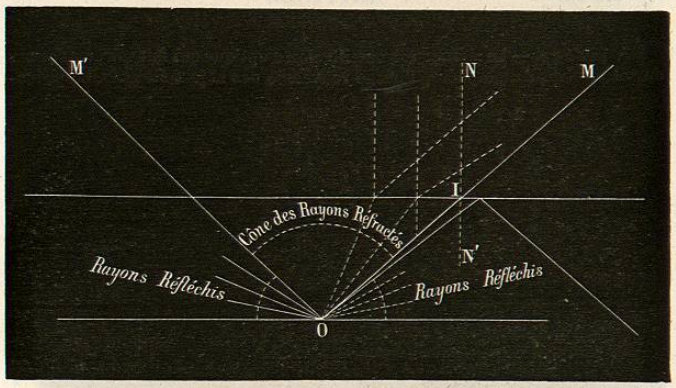

Fig. 494.

l'air, parce qu'ils font un angle d'incidence intérieur moindre que λ; 2° à l'extérieur du cône, tous les rayons incidents subissent la réflexion totale, parce qu'ils font un angle d'incidence intérieur plus grand que λ.

Constatation expérimentale de la réflexion intérieure. — On place devant un vase en verre rempli d'eau un objet A (fig. 495); puis on regarde de l'autre côté du vase la surface du liquide de bas

en haut, comme le montre la figure, et l'on aperçoit en a, au-dessus du liquide, l'image de l'objet A, laquelle est formée par les rayons réfléchis en m. Si, au contraire, on place l'œil au-dessus de la surface liquide, elle paraît complètement opaque par rapport au point A.

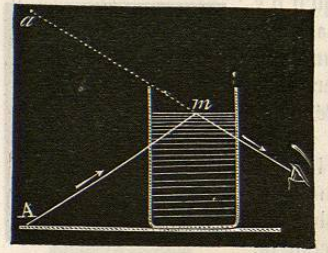

Fig. 495.

Formule de l'angle limite. — Soit θ l'angle limite. Il est défini par cette condition que l'angle de réfraction extérieure r soit égal à 90 degrés, et que, par suite, $\sin r = 1$. Si, dans la formule $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{1}{n}$, qui correspond au passage de la lumière d'un milieu plus réfringent dans un milieu moins réfringent, on fait $\sin r = 1$, on aura $\sin \theta = \frac{1}{n}$, donc $\theta = \text{arc} \sin \frac{1}{n}$.

443. **Mirage.** — Le *mirage* est une illusion d'optique qui fait voir, au-dessous du sol ou dans l'atmosphère, l'image renversée des objets éloignés. Ce phénomène s'observe fréquemment dans les pays chauds, et particulièrement dans les plaines sablonneuses de l'Égypte : le sol présente alors l'aspect d'un lac tranquille, sur lequel se réfléchissent les arbres et les villages environnants.

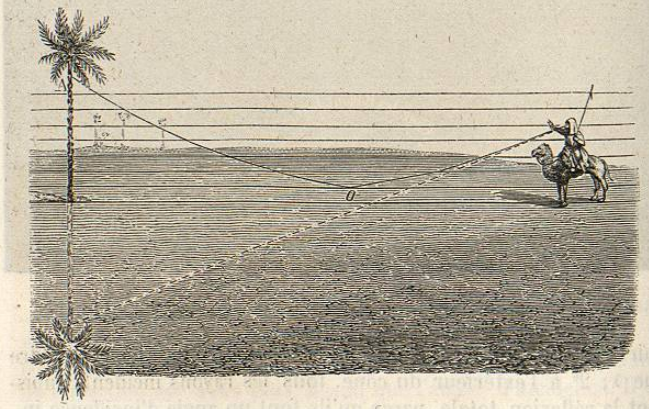

Fig 496.

Ce phénomène a été observé dès la plus haute antiquité; mais c'est Monge le premier qui en a donné l'explication.

Le mirage est un effet de *réflexion totale*. Au-dessus des sables brûlants du désert, les couches d'air, s'échauffant à leur contact, se superposent par ordre de densités croissantes de bas en haut. Un rayon lumineux tombant d'un objet élevé A (fig. 496) vers le sol traverse donc des couches de moins en moins denses et par conséquent de moins en moins réfringentes (453) ; l'angle d'incidence croît donc d'une couche à la suivante, et finit par atteindre l'angle limite : le rayon subit alors la réflexion intérieure, il se relève, comme le montre la figure, et se réfracte en suivant un chemin inverse et symétrique de la courbe AO, car il passe maintenant dans des couches de plus en plus réfringentes. La lumière arrive donc à l'œil de l'observateur dans la même direction que si elle venait d'un point situé au-dessous du sol et symétrique du point A (par rapport à la couche où s'est produite la réflexion) ; il voit une image renverée de l'objet qui l'a émis, comme si elle s'était réfléchie au point o, sur la surface d'un miroir.

Il arrive aussi que les navigateurs observent dans l'atmosphère l'image renversée des côtes ou des navires éloignés. C'est encore un effet de mirage, mais qui se produit en sens contraire du premier, c'est-à-dire lorsque la mer est plus froide que l'air : ce sont alors les couches inférieures de l'atmosphère qui sont les plus denses, à cause de leur contact avec la surface des eaux.

CHAPITRE V

DIOPTRIQUE (SUITE).

TRANSMISSION PAR LES MILIEUX RÉFRINGENTS. — LAMES ET PRISMES.

444. **Lames à faces parallèles.** — *Loi.* — Lorsque la lumière traverse une lame transparente à faces parallèles, les rayons émergents *sont parallèles* aux rayons incidents.

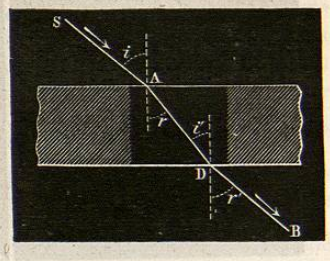

Fig. 497.

Démonstration. — Soient une glace à faces parallèles (fig. 497) (représentée par une section perpendiculaire à ses faces), SA un rayon incident, DB le rayon émergent, i et r les angles d'incidence et de réfraction à l'entrée du rayon, enfin r' et i' les mêmes angles à sa sortie.

En A, la lumière éprouve une première réfraction déterminée par l'équation $\frac{\sin i}{\sin r} = n$ (n étant l'in-