

directement éclairé par le soleil. L'explication de ce phénomène se trouve à l'Exercice 128. Le miroir agit comme une ouverture. La réflexion ne change pas la forme de l'image, mais seulement sa position.

138. Réduisez le miroir à une petite ouverture, projetez sur un écran blanc les rayons émis par deux bougies placées l'une près de l'autre, et observez l'image produite sur l'écran.

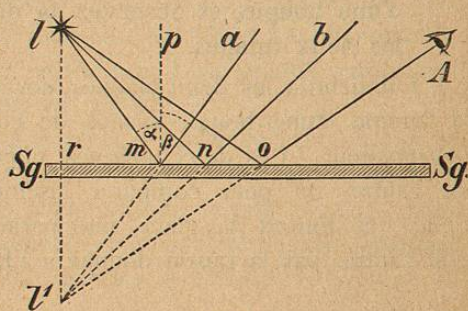
Pour réussir cette expérience, il faut placer, entre l'écran et les bougies, une paroi opaque, une planchette par exemple, qui s'avance jusque près du miroir. L'observation sera d'autant plus facile que l'écran paraîtra plus obscur. On découpera l'ouverture triangulaire, quadrangulaire ou de toute autre forme, dans une feuille de papier noir qu'on placera sur le miroir. Pour une ouverture carrée, on lui donnera environ 6^{mm} de côté. — On voit la flamme renversée, et la flamme de droite paraît à gauche dans l'image. Voyez l'explication aux Exercices 127 et 129.

139. Placez sur la table une bougie allumée, et devant elle un miroir; observez dans le miroir l'image de la flamme. (V. la fig.)

Le corps qui émet les rayons lumineux, ou, comme on dit plus brièvement en Optique, *l'objet*, nous apparaît, dans son image, derrière le miroir à une distance égale à celle de l'objet lui-même au miroir.

On prendra ensuite comme objet le support avec sa presse, une feuille imprimée, etc. L'explication de ces phénomènes repose sur les deux lois suivantes: Quand un rayon de lumière tombe sur la surface d'un miroir, il est réfléchi de telle manière que

1. le rayon incident et le rayon réfléchi se trouvent dans un même plan, perpendiculaire à la surface du miroir;
2. l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.



139.

Le point où le rayon rencontre la surface du miroir s'appelle *point d'incidence*; la ligne menée par ce point perpendiculairement à la surface se nomme la *normale* au point d'incidence; enfin, on entend par *angle d'incidence* et *angle de réflexion* les angles que font avec la normale le rayon incident et le rayon réfléchi.

La figure 139 représente le trajet de quelques-uns des rayons émis par le point *l*; la ligne *Sg Sg* représente le miroir. Un faisceau de rayons émis par *l* et rencontrant le miroir en *m* est réfléchi vers *a*, d'après les deux lois énoncées plus haut. Ainsi l'angle d'incidence α est égal à l'angle de réflexion β . D'après les mêmes lois, le faisceau lumineux *ln* est réfléchi dans la direction de *b*. Si l'œil de l'observateur reçoit un faisceau émané de *l* et réfléchi en *o*, il verra le point *l* dans la direction de *o*. Si l'œil était en *b*, il verrait le point *l* dans la direction de *n*. On démontre, par la géométrie, que les prolongements de tous les rayons partis d'un même point et réfléchis par un miroir plan vont concourir en un même point *symétrique* du point lumineux par rapport au miroir. Cela veut dire qu'on obtient ce point en abaissant du point lumineux une perpendiculaire sur le miroir et en la prolongeant d'une longueur égale de l'autre côté du miroir. Ainsi *ll'* est perpendiculaire au miroir et *lr* égal à *l'r*. Par suite le trajet que suivent les rayons à partir du miroir sera absolument le même, que ces rayons viennent directement du point *l* ou qu'ils viennent de *l* et se réfléchissent sur le miroir. Donc, quelque part que l'œil se trouve au-dessus du miroir, il verra toujours le point *l* dans la direction des rayons qui lui arrivent, c'est-à-dire en *l'*. Si un autre point de l'objet se trouve plus près du miroir que *l*, l'œil verra l'image de ce point plus rapprochée aussi: c'est ce qui explique pourquoi l'image est renversée par rapport à l'objet.

Voici encore une conséquence des lois de la réflexion. Si une personne *A* regarde dans un miroir une autre personne *B*, *B* doit aussi apercevoir *A* dans le miroir. On le comprend aisément en considérant le trajet des rayons lumineux. De *B* partent des rayons qui rencontrent le miroir et s'y réfléchissent de manière à parvenir à l'œil de *A*. Donc, par le même chemin, des rayons pourront partir de *A* et parvenir à l'œil de *B*.

140. Découpez une ouverture dans une feuille de papier noir, et tenez cette feuille à quelque distance devant le miroir, de telle sorte que l'on voie l'ouverture au milieu du miroir. Plaçant alors l'œil à différentes distances du miroir, observez les objets qui sont visibles dans l'image de l'ouverture.

On découpera une ouverture ronde d'environ 2^{cm} de diamètre. Pendant l'observation, on laissera la feuille dans la même position et à la même distance du miroir, le côté noir tourné vers le miroir. On tiendra ce dernier de manière que le paysage situé en face devienne visible dans l'ouverture. — L'œil verra d'autant plus d'objets dans l'image de l'ouverture qu'il sera plus près du miroir.

Les images que nous avons observées dans les Exercices 126, 127, 128, 129 et 137 restaient toujours les mêmes, quelle que fût la distance de l'œil à l'image; ici, au contraire, nous constatons que la grandeur des images dépend de la distance et de la position de l'œil par rapport à la surface réfléchissante. Tout se passe comme si l'œil regardait le paysage, non dans le miroir, mais directement à travers l'ouverture, car, plus il approche de cette ouverture, plus il découvre d'objets dans le paysage. L'image produite par un miroir n'est donc pas une image *réelle*, qu'on puisse recevoir sur un écran, comme dans l'Exercice 126; ce n'est qu'une image apparente ou, comme on dit, *virtuelle*.

En réalité, nous voyons dans un miroir l'objet lui-même; si nous croyons ne voir que son image, c'est que l'objet nous apparaît à une autre place.

141. Suspendez verticalement le miroir à un fil, et observez-y un objet pendant que le miroir tourne lentement. (V. la fig.)

La figure indique le mode de suspension à employer. Dans une feuille de fort papier, grande comme une carte postale, on fera dans la longueur quatre traits au canif; on formera ainsi deux bandes étroites entre lesquelles on glissera le miroir. — Avec un peu d'attention, on remarquera tout de suite que, le miroir tournant assez lentement, les objets qu'on y voit, surtout les plus



141.

éloignés, tournent plus vite que lui. — On se sert de cette disposition pour observer de très petits mouvements de rotation, par exemple ceux d'une aiguille aimantée. Ici, c'est le fil qui tourne, et une petite rotation pourrait passer inaperçue, si on l'observait en elle-même. Mais, grâce au miroir qui y est suspendu, nous verrons que, même après des heures et malgré toutes les précautions possibles, le fil n'arrive pas à se tenir en repos. Il y a toujours dans l'air de petits courants par l'action desquels varie constamment la température des différentes parties du fil, ce qui l'empêche de s'arrêter, lui et le miroir qu'il porte.

142. Comment faut-il disposer le verre de couleur et le miroir pour que l'objet apparaisse comme s'il était vu à travers deux plaques semblables?

Le rayon de lumière allant de l'objet à l'œil doit traverser la plaque colorée d'abord dans le trajet entre l'objet et le miroir puis dans le trajet entre le miroir et l'œil. On regardera donc à travers la plaque colorée vers le miroir, et on y observera les objets dont les rayons ont déjà traversé cette même plaque pour arriver au miroir. On prendra pour objet une bougie allumée ou un paysage vivement éclairé. On placera d'abord le verre bleu à 5^{cm} environs du miroir. Pour mieux observer la différence, on regardera de temps en temps vers le miroir, à côté de la plaque colorée.

143. Disposez les deux glaces parallèlement l'une à l'autre, et observez les images d'un objet placé entre les deux.

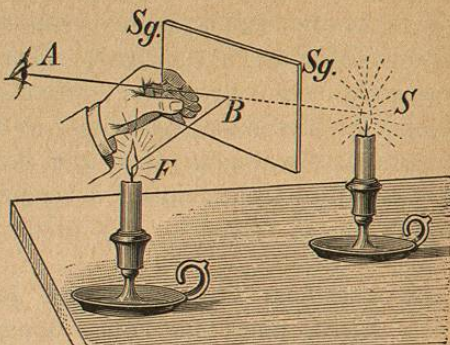
On trouvera, par quelques essais personnels, la meilleure manière d'exécuter cette expérience. La glace sans enduit réfléchit mieux lorsqu'on tient derrière elle une feuille de papier noir. En observant dans les miroirs parallèles la flamme d'une bougie, on aperçoit de nombreuses images produites par des rayons qui arrivent à l'œil les uns après une réflexion, d'autres après deux, trois, etc. Mais ces images deviennent de plus en plus faibles et finissent par échapper à l'observation.

144. Disposez les deux glaces sous un angle quelconque, et observez la position et le nombre des images produites par un objet situé entre les miroirs.

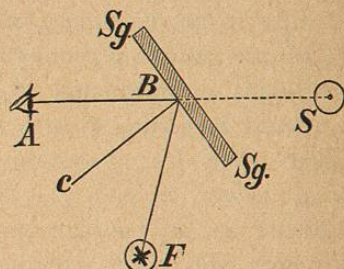
Le nombre des images dépend de la grandeur de l'angle

formé par les miroirs. Ainsi il s'en forme 4 pour un angle de 90°. Voyez, pour le reste, l'Exercice 143.

145. Placez à égale hauteur au-dessus de la table deux bougies dont une allumée. Entre les deux bougies tenez la glace sans enduit dans une position telle que, pour un œil placé du côté de la bougie allumée et regardant l'autre bougie à travers la glace, l'image de la flamme se produise sur la mèche éteinte, de telle sorte qu'elle paraisse allumée. (V. la fig.)



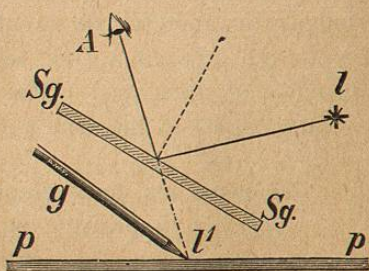
145a.



145b.

L'illusion se produit au delà de toute attente quand les deux bougies ont même hauteur et même épaisseur, et que, au moyen d'un écran, on empêche l'œil de voir la bougie *F* autrement que par réflexion. — *Sg* représente la glace. Les rayons émis par *F* arrivent à l'œil par le point *B*; par suite, la flamme *F* est aperçue sur le prolongement de *AB*, où se trouve la mèche non allumée *S*. Il est bon que les distances *FB* et *SB* soient exactement égales. — C'est par un procédé du même genre qu'on produit, dans les théâtres, l'apparition de spectres sur la scène.

146. Tenez la glace sans enduit obliquement au-dessus d'une feuille de papier blanc. Un œil placé au-dessus de la glace voit alors par réflexion les objets situés devant le miroir, droit devant lui, c'est-à-dire sur le papier.



146.

On essaiera de dessiner sur le papier, avec un crayon, les contours de ces objets. (V. la fig.)

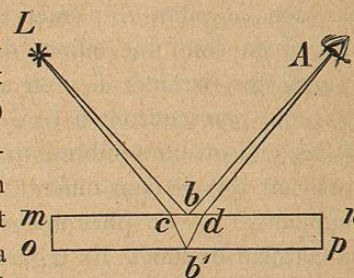
Sg représente le miroir, *p*, le papier, *g*, le crayon, *l*, un point de l'objet, *A*, l'œil du dessinateur. Le point *l* est aperçu par l'œil dans la direction de *l'* où l'on marquera un point au crayon.

147. Recherchez si les faces des deux plaques de glace sont bien planes.

On observera par réflexion sur la face à examiner un objet éloigné et rectiligne par exemple, la tige d'un paratonnerre, les montants des fenêtres d'un bâtiment éloigné, la hampe d'un drapeau, etc. Si la surface réfléchissante est bien plane, elle doit donner, en chacun de ses points, des images rectilignes comme les objets, sans courbure ni déformation. Pour mieux percevoir la différence, on observera le même objet avec une plaque de verre ordinaire, par exemple le verre bleu de la Collection. — Les plaques de verre à faces bien planes se nomment glaces, par opposition au verre à vitres ordinaire.

148. Observez la double réflexion avec le miroir argenté et avec la glace nue. (V. la fig.)

Dans les deux glaces de la collection, chaque objet se voit non seulement une fois, mais deux et même plusieurs fois. Ce fait n'aura pas échappé à l'observateur attentif, dans l'exécution des expériences



148.

précédentes. Il s'explique par cette circonstance qu'une glace a en réalité deux surfaces réfléchissantes. Dans la figure, *mnpo* représente une glace dont les surfaces réfléchissantes sont *mn* et *op*. Le faisceau lumineux émis suivant *Lb* est donc réfléchi vers l'œil *A* aussi bien que le faisceau *Lc*. Le rayon *Lb* est renvoyé vers *A* par la surface *mn*, le rayon *Lc* arrive en *b'*, s'y réfléchit sur la face *op* vers *d* et ensuite vers *A*. L'œil voit donc le point lumineux dans la direction *Ab* et aussi dans la direction *Ad*: il en voit donc deux. On remarque immédiatement ces deux images quand on observe, avec la glace nue, une

ligne droite éloignée. Si on ne les voit pas tout de suite, il suffit d'incliner un peu la plaque. — Mais le phénomène s'observe encore mieux lorsqu'on regarde dans le miroir une simple ligne lumineuse, ce qui peut se faire par une disposition très simple. Pour cela, on découpera dans une feuille de papier noir une fente d'environ 4^{cm} de long sur 2^{mm} de large, on fixera la feuille à la fenêtre, le côté noir vers l'observateur, et on observera dans le miroir cette ligne brillante sur fond noir. Toute lumière étrangère étant écartée, les deux images se produisent avec une netteté extrême. Avec la glace argentée, la seconde image est plus intense que la première parce que la face métallique réfléchit à peu près tous les rayons.

Dans des circonstances favorables, on observe même non seulement deux, mais plusieurs images. En voici l'explication. Le faisceau lumineux *b¹d* de la figure 148 ne sort pas tout entier du verre. Une partie seulement se propage jusqu'en *A*, l'autre est de nouveau réfléchi sur la surface *mn*. Ce dernier faisceau, renvoyé ainsi sur la face *op*, s'y réfléchit de nouveau et sort en partie du verre. Il est vrai, comme le montre la figure, que ce faisceau deux fois réfléchi n'arrive plus à l'œil, mais, remarquons le bien, le point *L* n'émet pas seulement les faisceaux *Lb*, et, *Lc*; il en émet une infinité d'autres dans toutes les directions, et, parmi ces derniers, il y en aura toujours certainement quelques-uns qui parviendront à l'œil après s'être réfléchis entre les deux faces 3, 5 ou un nombre impair quelconque de fois. Ces faisceaux arrivant à l'œil dans différentes directions, on voit plusieurs points lumineux. — Ce phénomène s'observe très bien la nuit quand il fait clair de lune. En regardant cet astre dans l'une des glaces et donnant au miroir la position voulue, on peut compter jusqu'à 7 images.

149. Recherchez si les faces des deux glaces sont bien parallèles entre elles, c'est-à-dire si les plaques ont partout la même épaisseur.

Nous avons recherché, dans l'Exercice 147, si les faces des deux plaques sont bien planes; nous allons examiner si ces plans sont parallèles entre eux. Dans ce cas, il est évident que les images multiples observées dans l'Exercice 148 doivent garder la même position respective lorsqu'on tourne la plaque de manière que sa face inférieure reste toujours dans un même plan.

Plaçons donc sur la table la glace à examiner, faisons-la tourner lentement, et observons-y en même temps les images de la fente pratiquée dans le papier noir placé à la fenêtre (Exercice 148). Nous remarquons que la position relative des images de la fente se modifie: nous devons en conclure que les deux faces supérieure et inférieure ne sont pas rigoureusement parallèles, mais qu'elles font entre elles un certain angle. — On observera de même dans les deux glaces les images multiples de la lune (Exercice 148), et on remarquera comment elles se déplacent pendant la rotation de la plaque.

150. Recevez sur le verre coloré les rayons du soleil, donnez à la plaque une inclinaison telle que les rayons soient réfléchis vers le plafond blanc, et observez les images du soleil qui s'y projettent.

Il se produit dans la réflexion quelques irrégularités, provenant de ce que les faces du verre coloré ne sont pas planes. En négligeant ce détail, on aperçoit au plafond deux surfaces éclairées, l'une blanche et l'autre bleue. La blanche est produite par la face supérieure du verre, la bleue par la face inférieure. En effet, les rayons qui se réfléchissent sur cette dernière ont dû traverser deux fois le verre bleu. — Si l'on observe dans ce même verre la fente découpée dans le papier noir (Exercice 148), on voit, en plaçant convenablement le verre, une fente blanche et claire et une autre bleue et plus faible. Pour cette dernière observation, on s'approchera peu à peu jusqu'à quelques centimètres de la fente.

151. Observez comment varie l'intensité des images produites par la glace nue quand on place derrière elle du papier de couleur et enfin du papier noir.

Quand on tient derrière la glace une feuille de papier jaune, les images de la fente découpée dans le papier noir (Exercice 148) paraissent notablement plus faibles; c'est quand on tient le papier noir que les images ont la plus grande intensité. Il est clair cependant que la présence du papier derrière la glace ne change rien à la réflexion. Si les images paraissent plus faibles avec le papier jaune, c'est uniquement parce que ce papier envoie à l'œil de vifs rayons jaunes, de manière que l'œil voit alors des images claires sur un fond clair. Au contraire le papier noir

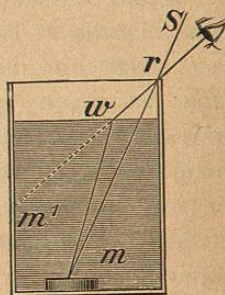
ne renvoie, peut-on dire, aucun rayon lumineux: on voit donc des images claires sur un fond obscur, et c'est ce qui les fait paraître plus nettement.

152. Comment peut-on faire un miroir horizontal avec une soucoupe pleine d'eau et une feuille de papier noir?

La surface de l'eau dans la soucoupe forme un plan horizontal, mais la réflexion sur cette surface est peu sensible, parce que la couleur blanche de la soucoupe forme un fond trop clair (Exercice 151). Mais si l'on place un disque de papier noir sur le fond de la soucoupe, la réflexion sur ce fond est supprimée, et celle qui se fait à la surface supérieure produit tout son effet.

Réfraction.

153. Mettez dans un verre une pièce de monnaie, et placez l'œil dans la position où il cesse précisément de voir la pièce par dessus le bord du verre. Versez alors peu à peu de l'eau dans le verre, et observez comment la pièce redevient peu à peu visible. (V. la fig.)



153a.

Dans la première figure, m est la pièce de monnaie. Pour la voir quand le verre est vide, l'œil doit se trouver au moins en S , le rayon $m r S$ rasant alors le bord du vase. Mais s'il se trouve en dessous de S , il cesse de voir la pièce, car aucun rayon parti de m ne peut plus lui parvenir. Or, en versant de l'eau dans le verre, l'œil, sans changer de position, voit de nouveau la pièce de monnaie. Il parvient donc à l'œil des rayons émis par la pièce, et, comme elle n'a pas changé de position pas plus que l'œil ni le verre, ces rayons n'ont pu arriver à l'œil en ligne droite: ils ont dû nécessairement suivre une ligne brisée. Soit $m w r$ cette ligne aboutissant à l'œil. Nous voyons que le rayon $m w$, en passant de l'eau dans l'air ou au point w , se propage dans une direction différente de sa

direction primitive. Ce phénomène important se nomme *réfraction*; il se produit toujours au point où les rayons passent d'un corps dans un autre, ou, comme on dit en Optique, d'un *milieu* dans un autre. Le mot *milieu* équivaut ici au terme *conducteur* employé pour la chaleur et l'électricité.

Pour exprimer plus aisément comment se produit ce phénomène et pour en énoncer les lois, on a introduit trois notions, correspondant à celles qui ont été indiquées à propos de la réflexion (Exercice 139).

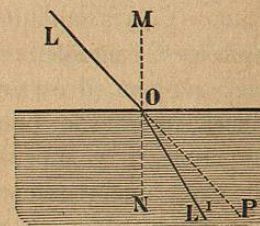
La perpendiculaire à la surface de séparation menée par le point où les rayons lumineux rencontrent cette surface s'appelle la *normale* au point d'incidence. On entend par *angle d'incidence* et *angle de réfraction* les angles que font avec la normale le rayon incident et le rayon réfracté. Dans la seconde figure, MON est la normale, LOM l'angle d'incidence, $L'ON$ l'angle de réfraction. De plus, quoique ces termes ne soient malheureusement guère usités en français, nous dirons, dans l'Optique, qu'un corps est *meilleur milieu* qu'un autre lorsque la lumière se propage plus vite dans le premier que dans le second; et *moins bon milieu* dans le cas contraire.

Cela posé, voici les lois à retenir:

1. Le rayon incident, le rayon réfracté et la normale sont toujours dans un même plan.
2. Quand un rayon de lumière passe d'un meilleur milieu dans un moins bon, l'angle de réfraction est plus petit que l'angle d'incidence et *vice-versa*.

En d'autres termes, le rayon se rapproche de la normale dans le 1^r cas, il s'en éloigne dans le 2^d. On dit encore que le moins bon milieu est le *plus réfringent*.

Les quatre milieux optiques les plus importants sont l'air, l'eau, le verre ordinaire et le sulfure de carbone, liquide composé de carbone et de soufre. L'air est le meilleur des quatre, la lumière s'y propage plus vite que dans les trois autres; cette vitesse est moindre dans



153b.

l'eau, moindre encore dans le verre et est la plus petite dans le sulfure de carbone. Dans la fig. 2, l'angle d'incidence LOM est plus grand que l'angle de réfraction, le rayon incident LO se propage donc dans un milieu optique meilleur que celui du

rayon réfracté $L'O$. Si le premier milieu est l'air, le second peut être l'eau, le verre ou le sulfure de carbone; mais si le premier est l'eau, le second ne peut être que le verre ou le sulfure de carbone.

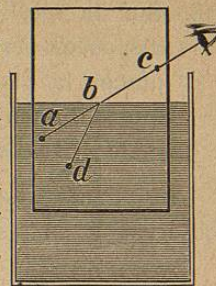
Nous avons dit, dans la 2^{de} loi, et *vice-versa*. Cela signifie qu'un rayon passant d'un milieu moins bon dans un meilleur s'éloigne de la normale, ou que l'angle de réfraction est alors plus grand que l'angle d'incidence. En un mot, le plus grand des deux angles se trouve dans le meilleur des deux milieux. Dans la 2^{de} figure, les milieux restant les mêmes, si $L'O$ est le rayon incident, LO sera le rayon réfracté. Dans la 1^{re} figure, chaque rayon partant de la pièce de monnaie passe d'un milieu moins bon, l'eau, dans un meilleur, l'air; le rayon incident mw se réfracte suivant wr . En plaçant au point w un fil à plomb, on verrait que l'angle d'incidence est plus petit que l'angle de réfraction.

Le faisceau lumineux mw arrive à l'œil dans la direction wr ; par suite, l'œil rapporte le point lumineux m sur le prolongement de rw et à une distance wm' égale à wm . La pièce de monnaie paraît donc relevée et en même temps plus éloignée.

154. Plongez obliquement et jusqu'à moitié dans l'eau une aiguille à tricoter, et observez la flexion apparente de l'aiguille.

En regardant suivant la longueur de l'aiguille, on voit la partie qui plonge dans l'eau apparaître comme repliée vers le haut. Cela s'explique aisément si l'on considère la figure 153. Soit $m r S$ l'aiguille et m son point le plus bas. L'œil se trouvant en S ne peut, il est vrai, recevoir le rayon mn après sa réfraction, mais, comme le point m envoie des rayons dans toutes les directions, il y aura toujours quelqu'un de ces rayons (à gauche de mn) qui parviendra à l'œil et fera sur celui-ci la même impression que si le point m se trouvait plus haut qu'il ne l'est réellement. — Le même raisonnement s'appliquant à tous les points de l'aiguille situés sous l'eau, l'œil aperçoit cette partie comme une ligne droite, mais repliée vers le haut.

155. Tracez sur une feuille de fort papier la ligne droite abc , et plongez le papier dans l'eau jusqu'au point b ; en regardant le long de cb on voit la partie ba brisée vers le haut. (Exercice 154.) Cherchez alors la position que doit avoir une ligne cd pour paraître dans le prolongement de cb . (V. la fig.)



155.

Le moyen le plus simple, c'est de tracer la ligne db à part sur une bande de papier qu'on fixera en b de manière qu'elle puisse tourner autour de ce point. La ligne brisée dbc représente le chemin d'un faisceau lumineux qui parvient à l'œil quand la feuille plonge dans l'eau jusqu'en b .

156. Tracez des lignes parallèles sur une feuille de papier, et placez sur cette feuille un verre plein d'eau. Dirigez le regard perpendiculairement aux parallèles, et comparez la position relative des lignes qu'on aperçoit en regardant obliquement à travers l'eau et de celles qu'on voit directement à côté du verre.

Les lignes placées sous le verre paraissent s'être éloignées de l'observateur, mais en restant parallèles entre elles. Cette apparence s'explique par les mêmes raisons que l'expérience analogue du n° 153. La grandeur du déplacement dépend de la hauteur de l'eau: on fera varier celle-ci, en versant de l'eau dans le verre.

157. Placez au soleil un verre vide, et disposez devant ce verre un corps qui puisse produire une ombre (par exemple le verre bleu), de telle sorte que l'ombre recouvre tout juste le fond entier du verre. Versez alors de l'eau dans le verre en observant comment l'ombre se déplace par rapport au fond.

L'ombre ne recouvre plus le fond tout entier, car les rayons du soleil passent d'un milieu meilleur dans un moins bon; dès lors, ils se réfractent à la surface de l'eau, et l'angle de réfraction est moindre que l'angle d'incidence. Il est utile de représenter par un croquis la réfraction des rayons.