

Réflexion et réfraction

I Les lois de Snell-Descartes

1) Propagation dans un milieu homogène et isotrope

Un milieu est dit *homogène* si ses caractéristiques physico-chimiques (composition, masse volumique, température, indice de réfraction...) y sont les mêmes partout.

Un milieu est dit *isotrope* si ses caractéristiques physico-chimiques sont les mêmes quelle que soit la direction considérée dans le milieu.

De façon assez surprenante, certains matériaux (notamment des cristaux) peuvent être homogènes mais non isotropes, comme le cristal de calcite de la figure 1.

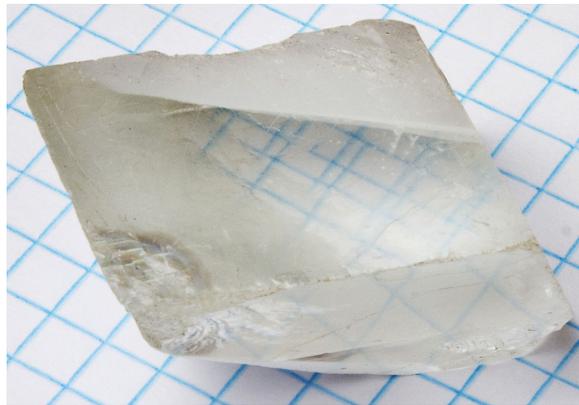


FIGURE 1 – Cristal de calcite anisotrope (on dit qu'il est biréfringent : son indice de réfraction dépend de la direction de polarisation de la lumière). Notez la double réfringence.

L'expérience (voir figures 2 et 4) montre que *dans un milieu homogène et isotrope, les rayons lumineux ont des trajectoires rectilignes.*



FIGURE 2 – Illustration de la propagation rectiligne dans l'eau

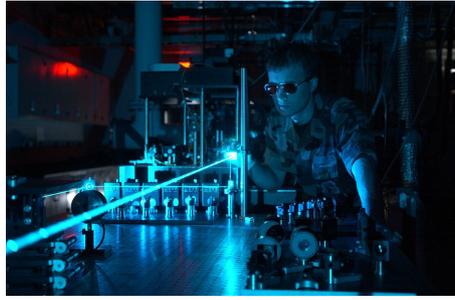


FIGURE 3 – Illustration de la propagation rectiligne dans l'air

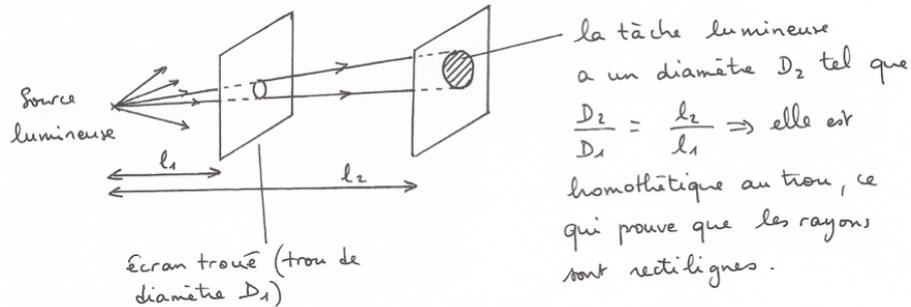


FIGURE 4 – Une autre preuve expérimentale de la propagation rectiligne dans un milieu homogène et isotrope (évidemment, cela ne marche que si le trou est de diamètre suffisamment grand (supérieur à quelques millimètres) pour que la diffraction soit négligeable)

Remarque importante : Principe du retour inverse : Le "principe du retour inverse" (qui peut être utile dans certaines situations) énonce que si un rayon lumineux peut prendre une trajectoire dans un sens, alors la même trajectoire en sens inverse est possible aussi. En d'autres termes "le trajet suivi par la lumière est indépendant du sens de propagation".

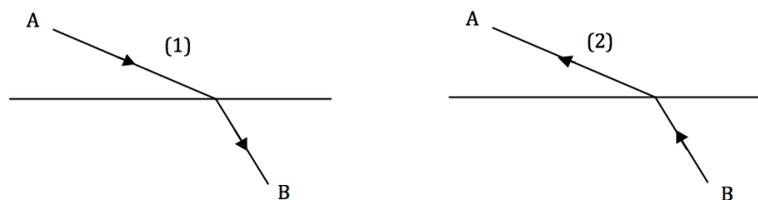


FIGURE 5 – Principe de retour inverse : si la lumière emprunte la trajectoire (1) pour aller de A à B, alors elle empruntera la trajectoire (2) pour aller de B à A.

On va voir maintenant ce qui se passe quand un rayon passe d'un milieu homogène et isotrope à un autre.

2) Les lois de la réflexion et de la réfraction

a) Définitions

On appelle *dioptre* l'interface entre deux milieux transparents d'indices différents.

Considérons un rayon lumineux qui rencontre un dioptre. On appelle *plan d'incidence* le plan contenant le rayon incident et la normale au dioptre à l'endroit où le rayon le rencontre (ce plan n'est donc pas défini dans le cas d'une incidence normale).

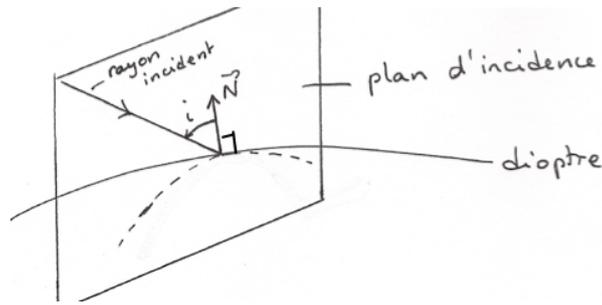
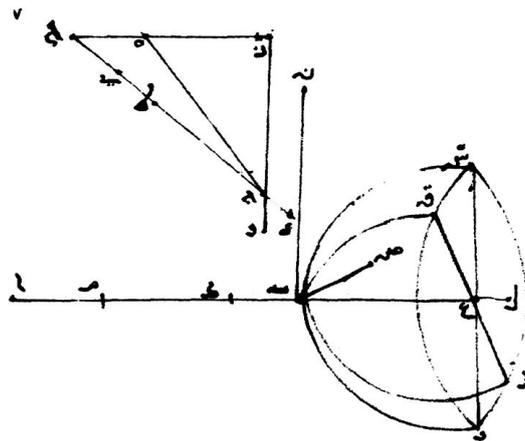


FIGURE 6 – Illustration de ce qu'est le plan d'incidence

b) Les lois de Snell-Descartes

Ces lois ont été établies par Willebord Snell aux Pays-Bas en 1621 puis, de manière indépendante, par René Descartes en France en 1637. En fait, un manuscrit montre qu'elles avaient déjà été établies par le mathématicien et physicien arabe Ibn Sahl en 984 (dans son ouvrage "Traité sur les miroirs brûlants et les lentilles" : voir figure 7).



لانه ان ماتة عليها سطح مستوي غيره فلان هذا السطح يقطع سطحين
 على نقطة ب فلا بد من ان يقطع احد خطي ب ن بص فليكن ذلك
 الخط مبصر والفصل المشترك بين هذا السطح وبين سطح قطع ق ر
 خط ب ن فلان هذا السطح يماس مسيط ب على نقطة ب فخط
 ب ن يماس سطح ق ب ر على نقطة ب وكذلك خط ب ن وفصل
 فلا يماس مسيط ب على نقطة ب سطح مستوي غير سطح ب ن ص

FIGURE 7 – Page du manuscrit d'Ibn Sahl où est expliquée la construction du rayon réfracté : cette construction est équivalente aux lois de Snell-Descartes

Le mathématicien et physicien français Pierre de Fermat les a démontrées en partant du principe que la lumière choisit toujours le chemin le plus rapide pour aller d'un point à l'autre (voir exercices).

Elles peuvent également être démontrées en revenant à la nature ondulatoire de la lumière (vous le verrez l'an prochain).

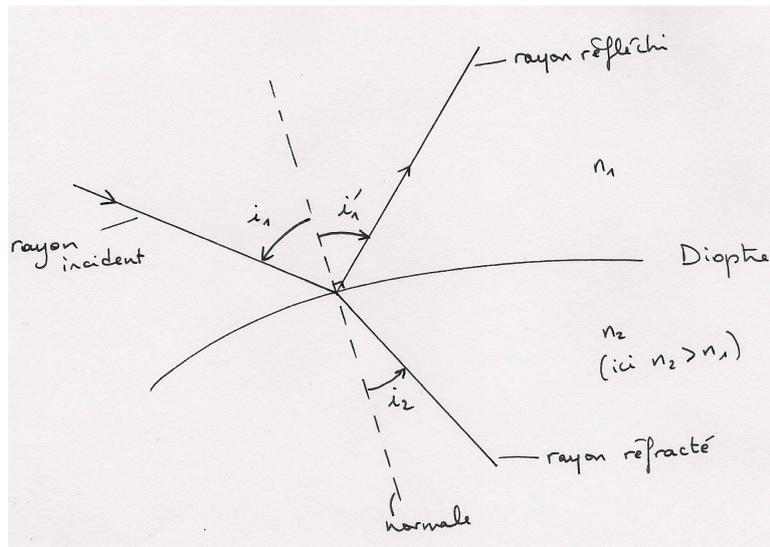


FIGURE 8 – Rayon incident, réfléchi et réfracté lorsque la lumière rencontre un dioptra

Considérons un rayon incident qui rencontre un dioptra entre deux milieux d'indices n_1 et n_2 . De manière générale, ce rayon va donner naissance à deux autres rayons : l'un qui reste dans le milieu d'incidence (appelé rayon réfléchi) et l'autre qui traverse le dioptra (appelé rayon réfracté). Ces deux rayons sont tels que :

- ils appartiennent tous deux au plan d'incidence
- l'angle de réflexion i_1' est tel que $i_1' = -i_1$
- l'angle de réfraction i_2 est tel que $n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$

On peut remarquer immédiatement que quand un rayon lumineux passe dans un milieu plus réfringent, il se rapproche de la normale (et il s'en éloigne s'il va vers un milieu moins réfringent).

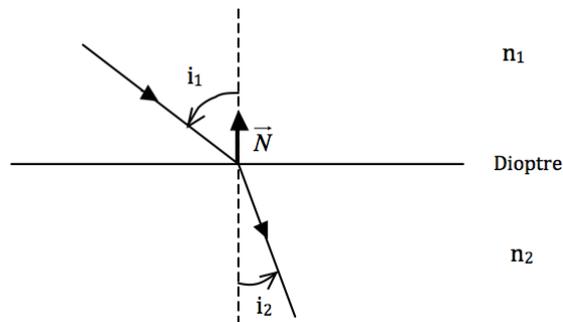


FIGURE 9 – Cas où $n_2 > n_1$: le rayon se rapproche de la normale quand il passe dans un milieu plus réfringent

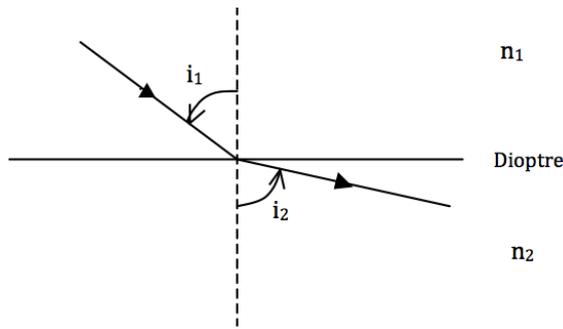


FIGURE 10 – Cas où $n_2 < n_1$: le rayon s'éloigne de la normale quand il passe dans un milieu plus réfringent. C'est dans ce cas qu'il peut y avoir réflexion totale, comme on va le voir par la suite.

II Le phénomène de réflexion totale

1) Description, angle limite

On se place dans le cas où le rayon lumineux va vers un milieu moins réfringent, soit $n_2 < n_1$: on a vu que dans ce cas, le rayon s'écarte de la normale.

Il existe donc une valeur de l'angle d'incidence i_1 telle que l'angle de réfraction i_2 vaut $\pi/2$. Au delà de cette valeur de i_1 , le rayon réfracté n'existe plus (et donc le rayon réfléchi devient plus intense) : on dit qu'il y a réflexion totale.

Il est évident que l'angle d'incidence limite à partir duquel il y aura réflexion totale est donné par :

$$n_1 \sin(i_{1,lim}) = n_2 \sin(\pi/2) \quad (1)$$

soit :

$$i_{1,lim} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (2)$$

Si $i_1 > i_{1,lim}$, il n'y a plus de rayon réfracté : c'est la réflexion totale.

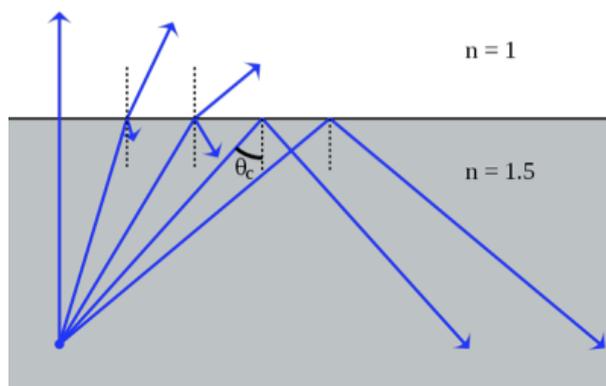


FIGURE 11 – Illustration du phénomène de réflexion totale.

2) Application : la fibre optique à saut d'indice

L'application technologique la plus importante à ce phénomène est la fibre optique, qui devient omniprésente dans le domaine des télécommunications.

On va étudier ici la fibre à *saut d'indice*, constituée de deux couches de verre d'indices différents (la couche extérieure, appelée "gaine", ayant un indice plus faible que la couche centrale, appelée "coeur"). Il existe également des fibres à *gradient d'indice*, où l'indice décroît continuellement en allant du centre vers les bords.

Si son angle d'incidence est correct, le rayon lumineux subit une réflexion totale à l'interface entre le coeur et la gaine et est donc guidé avec très peu de pertes.

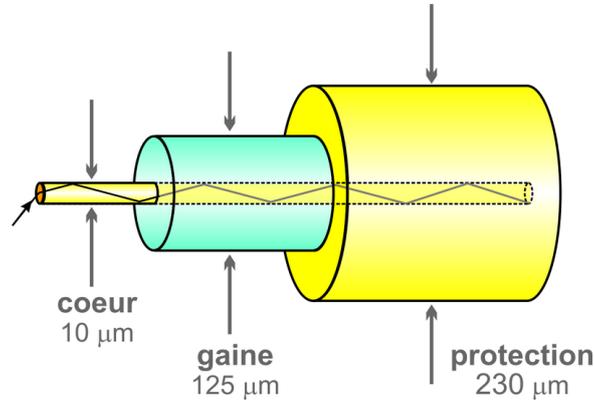


FIGURE 12 – Vue en coupe d'une fibre optique : le coeur et la gaine sont deux verres très purs (silice) d'indices légèrement différents, la couche protectrice est en plastique

Exercice d'application : On réalise une fibre optique avec un « coeur » en verre (silice) d'indice $n_1 = 1,5$ entouré d'une « gaine » d'indice inférieur $n_2 = 1,2$. Calculer l'angle maximal θ_{max} que peut faire un rayon lumineux à l'entrée de la fibre pour qu'il soit effectivement guidé (voir figures 13 et 14). Que se passe-t-il si $\theta > \theta_{max}$?

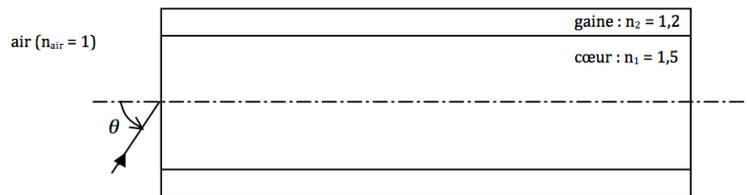


FIGURE 13 – À quelle condition sur θ le rayon est-il effectivement guidé par la fibre ?

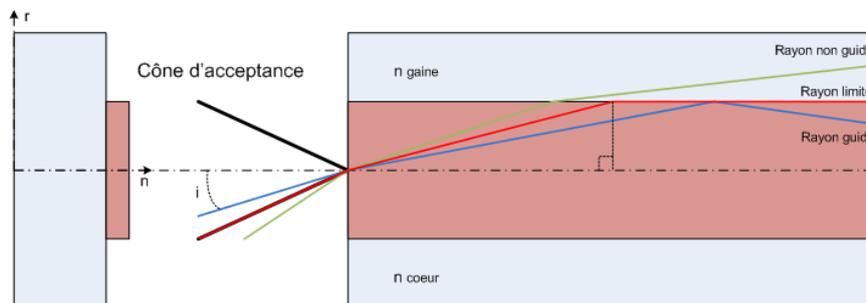


FIGURE 14 – Illustration du fait qu'un rayon entrant dans la fibre avec une incidence trop grande ne sera pas guidé

Les fibres optiques sont de nos jours très largement utilisées pour le transfert des données internet, comme le montre la figure 15. Elles sont aussi très utile en médecine en permettant d'avoir des

images de l'intérieur du corps sans devoir faire une opération chirurgicale lourde (on parle dans ce cas d'endoscopie).

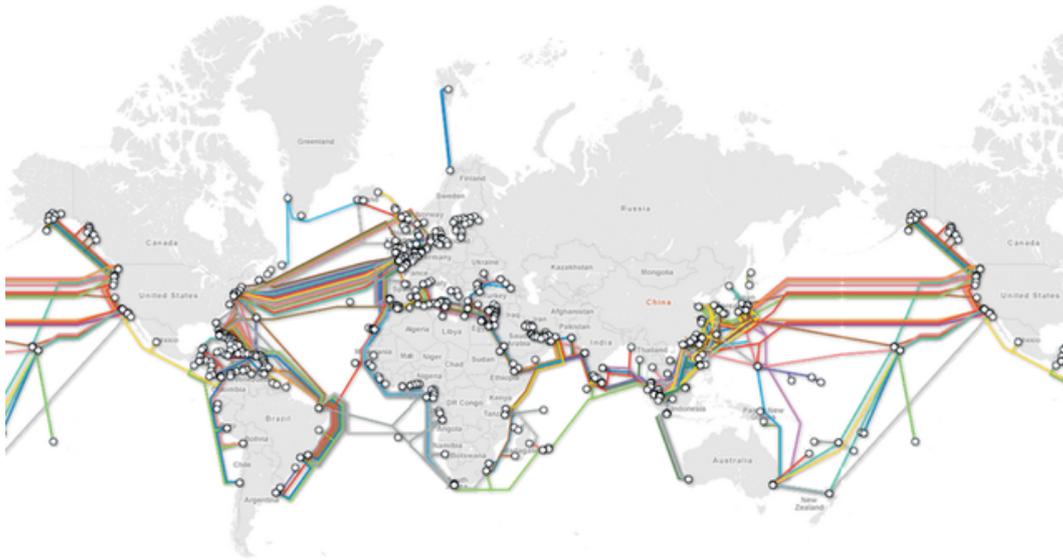


FIGURE 15 – Les principaux câbles de fibre optique sous-marins pour internet

III Propagation non rectiligne dans un milieu à gradient d'indice

1) Cas d'un milieu stratifié

Considérons pour commencer le cas d'un milieu transparent qui serait constitué d'une succession de couches d'indices différents (on parle de milieu "stratifié"), et supposons par exemple que plus on s'élève dans le milieu, plus l'indice diminue. La figure 18 montre l'allure de la trajectoire d'un rayon lumineux qui entrerait dans ce milieu depuis le bas : à chaque réfraction, le rayon lumineux s'écarte de la normale, jusqu'à ce que l'angle d'incidence devienne trop élevé et qu'il y ait réflexion totale.

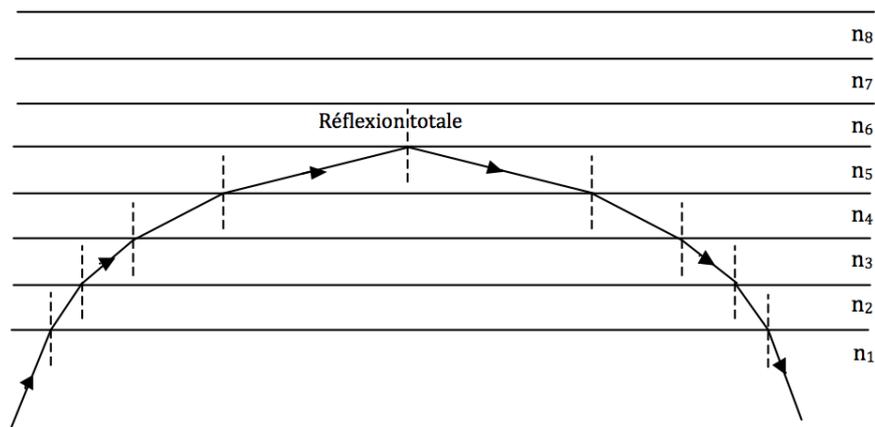


FIGURE 16 – Trajectoire d'un rayon lumineux dans un milieu stratifié (ici on a pris $n_1 > n_2 > n_3 \dots$)

Plus précisément, l'angle d'incidence i_k du rayon lumineux à l'entrée de la couche d'indice k vérifie la relation :

$$n_k \sin(i_k) = cte \quad (3)$$

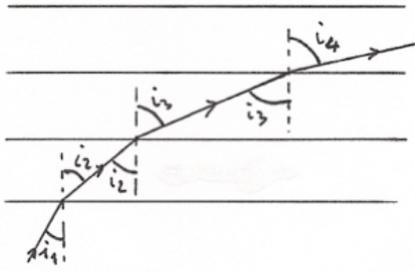


FIGURE 17 - $n_k \sin(i_k) = cte$

2) Passage au continu : milieu avec gradient d'indice

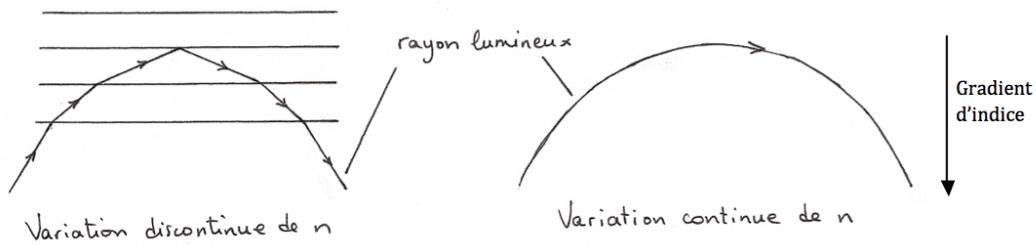


FIGURE 18 - Trajectoire d'un rayon lumineux dans un milieu stratifié (à gauche) puis présentant une variation continue de l'indice (à droite)

Le cas précédent d'un milieu stratifié se rencontre très rarement dans la nature. Ce qui est par contre beaucoup plus fréquent est le cas d'un milieu où l'indice varie de façon *continue* avec l'altitude : on dit alors que le milieu présente un *gradient d'indice*.

Ces variations continues d'indice sont très courantes dans l'air puisque l'indice de l'air dépend de sa masse volumique (n_{air} est d'autant plus grand que la masse volumique de l'air est élevée), et cette dernière peut dépendre de l'altitude à cause de variations de pression ou de température. De même dans l'eau, l'indice dépend de la concentration en certains solutés (sel, sucre), et donc il est fréquent d'avoir des gradients d'indices dans l'eau.

Pour comprendre ce qui arrive à un rayon lumineux se propageant dans un milieu avec un gradient d'indice, il suffit de faire tendre l'épaisseur des "couches" vers zéro : on comprends alors facilement que la trajectoire du rayon devient une courbe "lisse" (au lieu d'une ligne brisée) dont la concavité est tournée vers les indices les plus élevés, comme le montrent les figures 18 et 19.

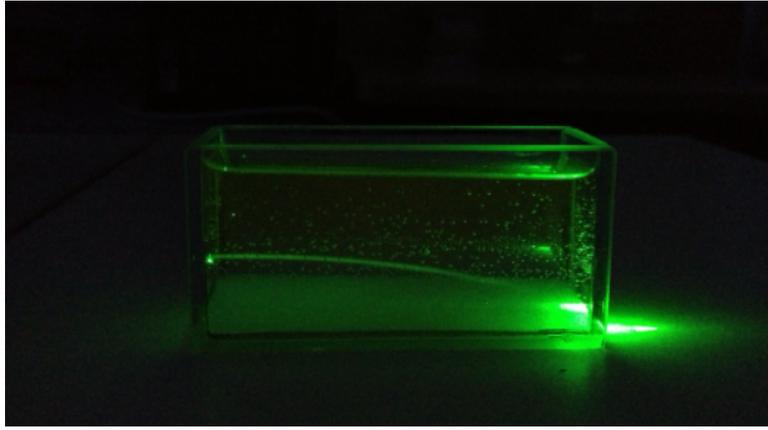


FIGURE 19 – Trajectoire non rectiligne d'un faisceau LASER dans de l'eau présentant un gradient d'indice (on a mis du sucre en bas, ce qui fait que l'indice est plus élevé en bas)

3) Explication des mirages

Cette propagation non rectiligne de la lumière dans un milieu présentant un gradient d'indice permet d'expliquer le phénomène de "mirages" : l'été, une route très chaude (ou du sable très chaud dans le désert) peut paraître mouillée alors qu'elle est parfaitement sèche.

En réalité, comme la route est très chaude, l'air situé à proximité est également très chaud, donc moins dense, et donc d'indice plus faible que l'air situé plus haut. Il apparaît donc un gradient d'indice dirigé vers le haut qui incurve les rayons lumineux. Certains rayons lumineux venus d'un arbre au bord de la route (par exemple) vont donc pouvoir arriver sur notre œil "par le bas", ce qui va former une image de l'arbre au niveau de la route, similaire à ce que l'on observerait si l'arbre s'était réfléchi sur une flaque d'eau sur la route (voir figure 20).

Notons que le mirage n'est pas une "illusion d'optique" : ce n'est pas le traitement de l'image par notre cerveau qui est fautif et ce que nous "voyons" correspond réellement à l'image qui se forme sur notre rétine. La preuve est que l'on peut prendre un mirage en photo.

La seule faute dont notre cerveau est éventuellement coupable est d'attribuer cette réflexion au fait que la route serait mouillée, plutôt qu'au fait qu'il y a un gradient d'indice dans l'air (mais, dorénavant, vous ne ferez plus cette erreur!).



FIGURE 20 – Mirage sur une route chaude en été

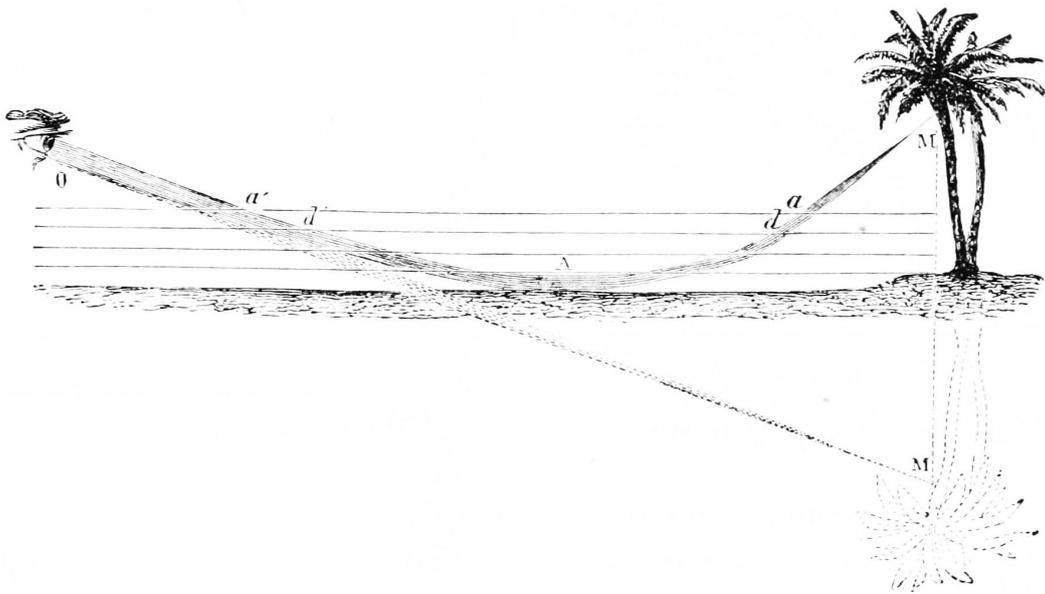


FIGURE 21 – Explication du phénomène de mirage



FIGURE 22 – Mirage froid ou "inversé", lorsque le gradient d'indice est dirigé vers le bas.

Les gradients d'indice présents dans l'atmosphère à plus grande échelle, qui sont dirigés vers le bas (puisque l'atmosphère est globalement plus dense au niveau du sol qu'à haute altitude) expliquent aussi le fait que la direction apparente dans laquelle on voit une étoile n'est pas la direction réelle dans laquelle se trouve l'étoile. Ce même phénomène explique pourquoi on continue de voir le soleil pendant un certain temps après qu'il se soit "couché", i.e. après qu'il soit passé sous l'horizon (voir figure 22).

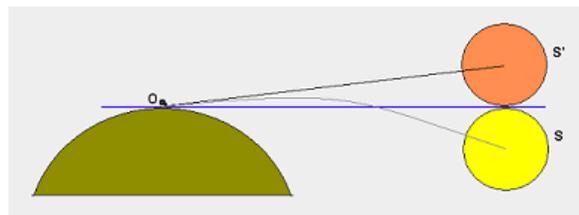


FIGURE 23 – Position réelle (en jaune) et position apparente à cause de la réfraction atmosphérique (en rouge) du soleil juste après son coucher