Nom :_________________________ Prénom : ___________________

Définition

La réfraction est la déviation de la lumière lorsqu'elle traverse l'interface entre deux milieux transparents de densités optiques différentes.

Indice de réfraction

L'indice de réfraction d'un milieu est une mesure de sa densité optique. L'indice de réfraction d'un milieu doit être égal ou supérieur à un. Il est représenté par le symbole *n* (ou parfois *N*).

Indice de réfraction de quelques milieux

Milieu	Indice de réfraction *n*
Vide	1
Air	1,0003
Eau	1,33
Verre	1,5 à 1,8
Diamant	2,42

En général, on considère que l'indice de réfraction de l'air est égal à celui du vide afin de simplifier les calculs.

Indice de réfraction et vitesse de la lumière

Vous avez peut-être déjà entendu dire que la lumière a une vitesse unique. Cette affirmation n'est pas tout à fait juste. Il faudrait plutôt dire que la vitesse de la lumière est unique pour un milieu donné. En effet, la lumière se propageant dans un milieu autre que le vide a une vitesse inférieure à celle qu'elle a dans le vide. De plus, pour un milieu donné (ou le vide) la vitesse de la lumière est constante.

C'est un peu comme lorsque vous tentez de courir dans l'eau. Vous ne pouvez pas aller aussi vite que si vous courriez sur la terre ferme, tout ça à cause de la plus grande densité de l'eau par rapport à l'air. Il se produit la même chose pour la lumière. Elle rencontre une « résistance » lorsqu'elle se propage dans un milieu, car tout milieu a une « densité optique » plus grande que le vide.

L'indice de réfraction est une mesure de cette densité optique. Concrètement, il s'agit d'une mesure de vitesse de la lumière dans un milieu donné comparativement à sa vitesse dans le vide. Cette relation s'exprime comme suit :

$$n = \frac{c}{v}$$

où [redacted] est l'indice de réfraction, c, la vitesse de la lumière dans le vide, et v, la vitesse de la lumière dans le milieu. La vitesse de la lumière dans le vide est d'approximativement 3 x 10^8 m/s. Comme la vitesse de la lumière dans un milieu ne peut être qu'inférieure à sa vitesse dans le vide, l'indice de réfraction d'un milieu ne peut pas être plus petit que un.

Le tableau ci-dessous indique la vitesse de la lumière dans divers milieux.

Vitesse de la lumière dans différents milieux

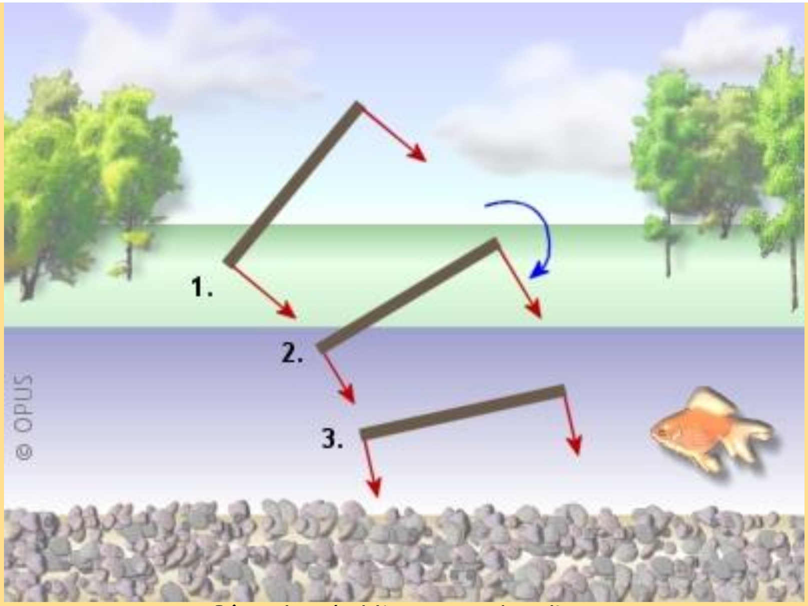
Milieu	Vitesse de la lumière (m/s)
Vide	299 792 458
Air	299 702 547
Eau	225 407 863
Verre	166 551 366 à 199 861 164
Diamant	123 881 181

Mais pourquoi la lumière est-elle déviée?

On peut légitimement se demander quel est le lien entre le changement de la vitesse de la lumière dans différents milieux et la déviation de la lumière lorsqu'elle traverse l'interface entre deux milieux. Voici une simple analogie qui tentera de répondre à cette question.

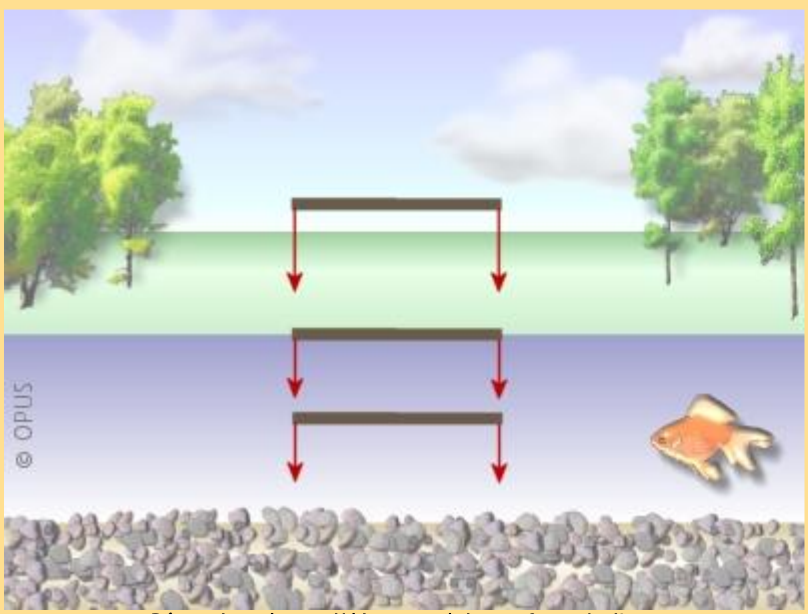
Imaginons-nous sur le bord d'un étang, par une belle journée d'été. La surface de l'eau étant trop calme à notre goût, nous décidons de la troubler quelque peu en lançant à l'eau un bâton de bois déniché sur la rive.

1. Nous choisissons donc un beau bâton bien droit que nous lancerons obliquement par rapport à la surface de l'eau. Nous supposerons dans ce qui suit que le bâton ne tourne pas sur lui-même avant de toucher à l'eau et qu'il est perpendiculaire à la direction de son déplacement.
2. Le bâton ayant été lancé obliquement, l'une de ses extrémités touchera la surface de l'eau et la traversera avant l'autre. Puisque la densité de l'eau est supérieure à celle de l'air, l'extrémité qui se trouve maintenant dans l'eau se déplacera à une vitesse plus petite que celle se trouvant toujours dans l'air. Notre bâton subira alors une rotation jusqu'à ce que sa seconde extrémité pénètre dans l'eau.
3. Le bâton poursuivra alors son chemin en ligne droite dans l'eau, mais selon une trajectoire déviée par rapport à sa trajectoire originale.



Bâton lancé obliquement dans l'eau

Tentons maintenant de voir ce qui se produit lorsque nous laissons tout simplement tomber le bâton afin qu'il soit parallèle à la surface de l'eau. Ses deux extrémités touchent alors à la surface de l'eau en même temps. Elles ont donc toujours la même vitesse et le bâton ne subit pas de rotation.

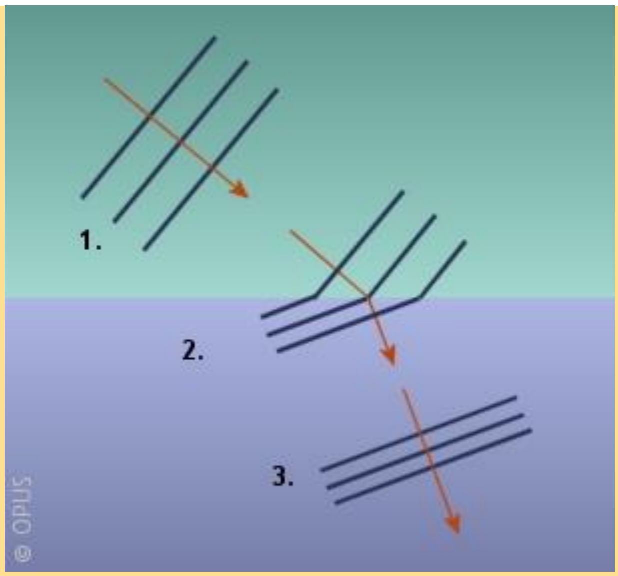


Bâton lancé parallèlement à la surface de l'eau

En quoi cette expérience nautique est-elle analogue à la réfraction de l'eau?

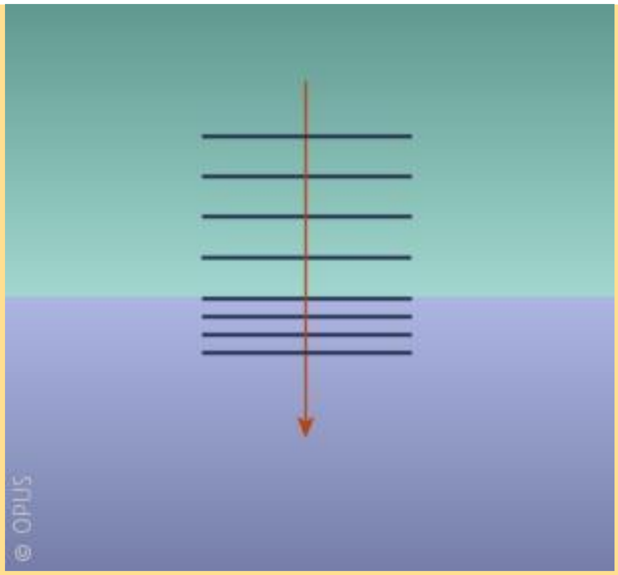
1. Si nous associons à la trajectoire du bâton le rayon lumineux, et au bâton lui-même, une série de fronts d'onde de la lumière, nous nous retrouvons avec la situation illustrée à la figure ci-dessous.

2. Lorsque le rayon lumineux est incident obliquement à la surface d'un milieu optique plus dense, les fronts d'onde qui y sont associés traversent progressivement l'interface entre les deux milieux. Ainsi, à un instant donné, la partie d'un front d'onde se trouvant dans le second milieu se déplace à une vitesse inférieure que la partie de ce front d'onde se trouvant toujours dans le milieu initial.
3. Lorsque les fronts d'onde ont entièrement pénétré le milieu plus dense, la direction du rayon lumineux est différente de sa direction initiale, et la distance entre les fronts d'onde est diminuée.



Rayon lumineux à incidence oblique

Enfin, lorsque le rayon lumineux est incident perpendiculairement à l'interface entre les deux milieux, le front d'onde associé est alors parallèle à la surface. Tous ses points traversent donc la surface en même temps et subissent ainsi le même changement de vitesse au même moment.



Rayon lumineux à incidence normale

Lois de la réfraction

Définitions

Le rayon incident est un rayon de lumière qui se dirige vers l'interface entre les deux milieux.

Le rayon transmis est le rayon de lumière qui s'éloigne de l'interface entre les deux milieux après avoir subi une réfraction. Il est parfois appelé rayon réfracté.

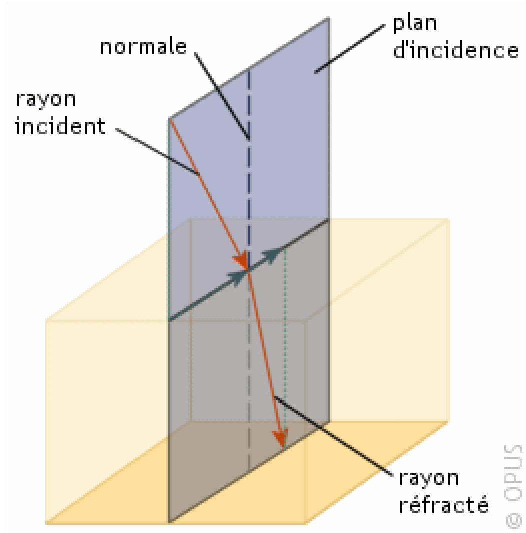
La normale à la surface est une droite perpendiculaire à l'interface entre les deux milieux et située au point d'impact du rayon incident sur l'interface.

L'angle d'incidence est l'angle formé par le rayon incident et la normale à la surface.

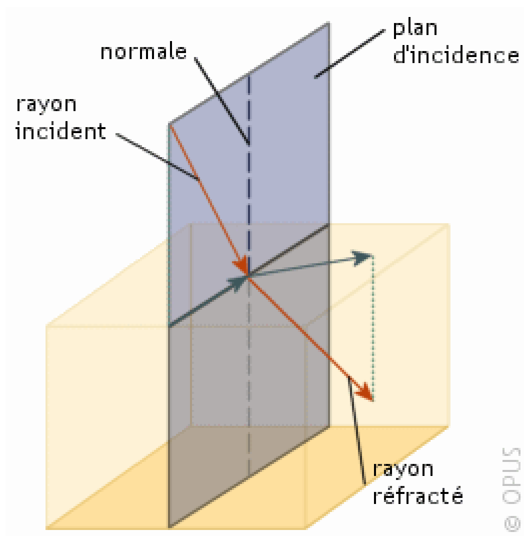
L'angle de transmission, ou de réfraction, est l'angle formé par le rayon transmis et la normale à la surface.

Première loi de la réfraction

Le rayon incident, la normale à l'interface entre les milieux et le rayon réfracté se trouvent tous trois dans un même plan, appelé plan d'incidence. De plus, les rayons incident et transmis se trouvent de part et d'autre de la normale.



1ère loi de la réfraction : le rayon incident, la normale et le rayon réfracté se trouvent tous dans le même plan.



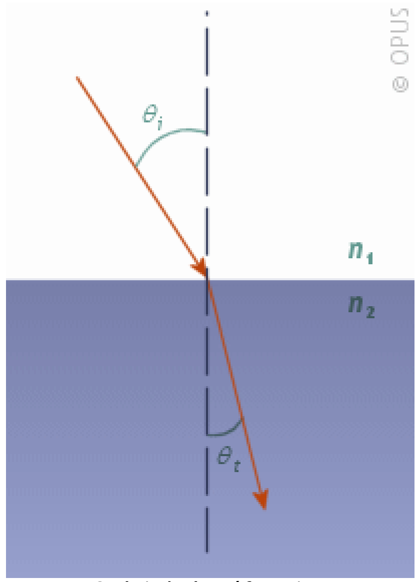
Violation de la 1ère loi de la réfraction : le rayon réfracté ne se trouve pas dans le plan d'incidence, qui est défini par le rayon incident et la normale. Il faut noter qu'en réalité, la loi ne peut pas être violée. Ce schéma n'est ici que pour illustrer ce qui se passerait si la 1ère loi de la réfraction n'existait pas.

Deuxième loi de la réfraction

Le rapport entre le sinus de l'angle d'incidence, dans le milieu 1, et le sinus de l'angle de transmission, dans le milieu 2, est égal au rapport entre l'indice de réfraction du milieu 2 et l'indice de réfraction du milieu 1. Cette loi s'appelle « loi de Snell-Descartes ».

$$\frac{\sin\theta_i}{\sin\theta_t} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$n_1 \sin\theta_i = n_2 \sin\theta_t$$



2e loi de la réfraction

On remarque que lorsque la lumière passe d'un milieu à un autre d'indice de réfraction supérieur, elle est réfractée plus près de la normale à l'interface entre les deux milieux.

Exemple : Quel sera l'angle de réfraction d'un pinceau lumineux passant de l'air (*n* = 1) à de l'eau (*n* = 1,33) avec un angle d'incidence de 40°?

$$n_1 = 1$$
$$n_2 = 1{,}33$$
$$\theta_i = 40°$$

$$n_1 \sin\theta_i = n_2 \sin\theta_t$$
$$\theta_t = \sin^{-1}\left(\frac{n_1 \sin\theta_i}{n_2}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{1 \times \sin 40°}{1{,}33}\right)$$
$$\theta_t = 28{,}9°$$

La réflexion totale interne

http://www.formationeda.com/sciences.php?sigle=PHY5041&matiere=physique

Lors du passage d'un rayon lumineux d'un milieu à un autre dont l'indice de réfraction est inférieur, on remarque qu'il s'éloigne de la normale à l'interface. Ainsi, l'angle de transmission est plus grand que l'angle d'incidence lorsque la lumière passe d'un milieu dense à un milieu moins dense. Aussi, plus l'angle d'incidence est grand, plus l'angle de transmission est grand aussi. Cependant, la variation de θ_t en fonction de θ_i n'est pas linéaire, l'angle de transmission variant plus rapidement que l'angle d'incidence. On peut donc se retrouver dans la situation où le rayon réfracté est perpendiculaire à la normale (θ_t = 90°). L'angle d'incidence provoquant cette situation est appelé « angle critique ».

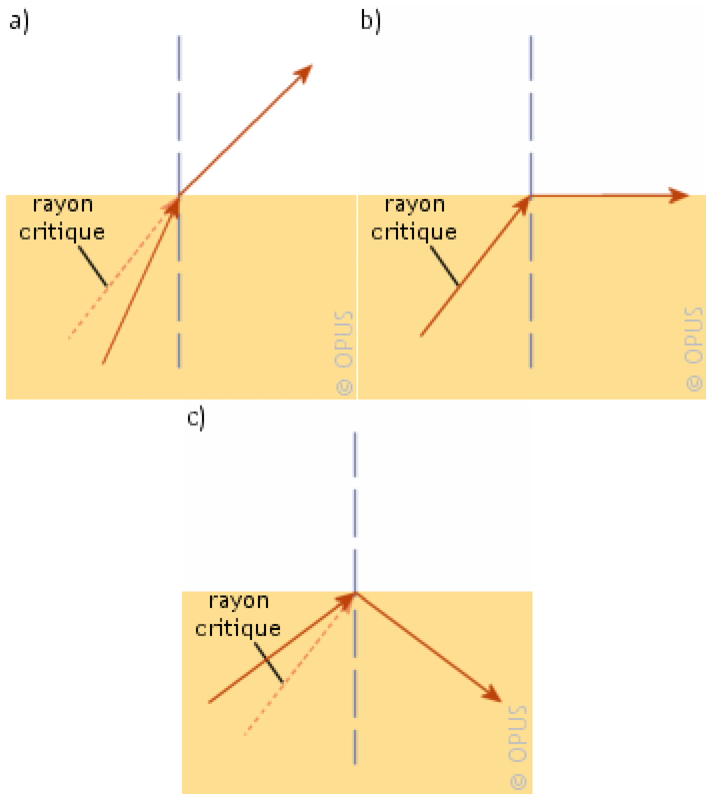
Variation de l'angle de transmission en fonction de l'angle d'incidence pour un rayon lumineux passant de l'eau à l'air

Angle d'incidence	Angle de transmission
0°	0°
10°	13,35°
20°	27,06°
30°	41,68°
40°	58,75°
45°	70,13°
48,7534666°	90°

Sachant que lorsque l'angle d'incidence est égal à l'angle critique, l'angle de transmission est de 90°, on peut calculer l'angle critique de la manière suivante :

$$n_1 \sin\theta_i = n_2 \sin\theta_t$$
$$n_1 \sin\theta_c = n_2 \sin 90°$$
$$n_1 \sin\theta_c = n_2 \times 1$$
$$\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$
$$\boxed{\theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)}$$

Si l'angle d'incidence est supérieur à l'angle critique, le rayon incident n'est pas transmis, mais est plutôt réfléchi selon les lois de la réflexion (voir *La réflexion*). L'angle critique est ainsi l'angle d'incidence maximal permettant à un rayon incident d'être transmis d'un milieu transparent à un autre, d'indice de réfraction inférieur. Ce phénomène s'appelle « réflexion totale interne ».



a) Réfraction de la lumière pour $\theta_i < \theta_c$; b) Réfraction de la lumière pour $\theta_i = \theta_c$; c) Réflexion totale interne de la lumière pour $\theta_i > \theta_c$

Exemple : Un pinceau de lumière se propageant dans du verre (n = 1,5) frappe l'interface entre le verre et l'eau (n = 1,33) avec un angle d'incidence de 55°. Le pinceau sera-t-il réfracté dans l'eau ou réfléchi totalement dans le verre? Si le pinceau est transmis dans l'eau, quel sera son angle de réfraction?

$$n_1 = 1{,}5$$
$$n_2 = 1{,}33$$
$$\theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{1{,}33}{1{,}5}\right)$$
$$\theta_c = 62{,}5°$$

Puisque l'angle d'incidence est plus petit que l'angle critique, le pinceau de lumière sera transmis dans l'eau.

$$\theta_i = 55°$$
$$n_1 \sin\theta_i = n_2 \sin\theta_t$$
$$\theta_t = \sin^{-1}\left(\frac{n_1 \sin\theta_1}{n_2}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{1{,}5 \times \sin 55°}{1{,}33}\right)$$
$$\theta_t = 67{,}5°$$

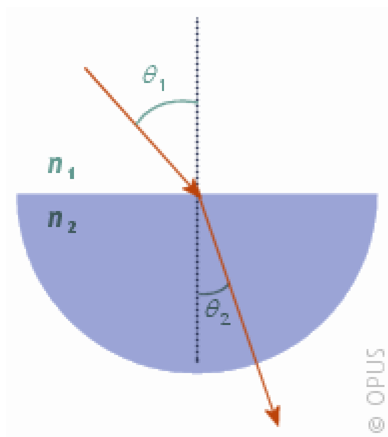
La réflexion totale interne est le phénomène à la base du fonctionnement de la fibre optique (voir Spécial optique : La fibre optique).

Quelques cas particuliers

Le prisme semi-circulaire

Le prisme semi-circulaire est un cas intéressant à considérer car, sous certaines conditions, un pinceau lumineux le traversant ne subit qu'une seule réfraction même s'il traverse deux interfaces. En effet, si le pinceau est incident au prisme au centre de sa surface plane, il subira une réfraction uniquement à cet endroit. Il traversera ensuite la surface courbe du prisme sans être réfracté parce qu'il sera alors à incidence normale (pour savoir comment trouver la normale à une surface courbe, consultez [Les miroirs courbes]).

> ***Exemple :*** Tracez le parcours d'un rayon lumineux incident au centre de la face plane d'un prisme semi-circulaire d'acrylique (n = 1,49) avec un angle d'incidence de 20°.



Réfraction à la surface plane

Puisque la surface est plane, on peut appliquer directement la loi de Snell-Descartes.

$$n_1 = 1$$
$$n_2 = 1{,}49$$
$$\theta_1 = 20°$$

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$
$$\theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{n_1 \sin\theta_1}{n_2}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{1 \times \sin 20°}{1{,}49}\right)$$
$$\theta_2 = 13{,}27°$$

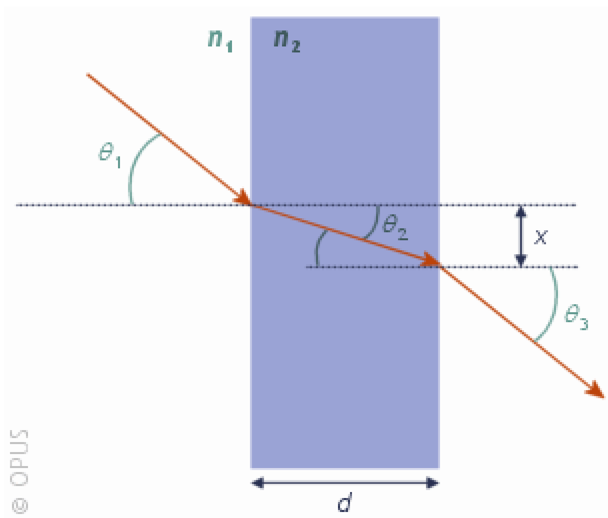
Réfraction à la surface courbe

Puisque le rayon réfracté émane du centre de courbure de la surface courbe du prisme, il se propage le long du rayon de courbure de cette surface. Sachant que le rayon d'un cercle est perpendiculaire à sa circonférence, on en conclut que le rayon lumineux a un angle d'incidence à la surface courbe qui est nul.

Le prisme rectangulaire

Un pinceau lumineux traversant un prisme rectangulaire, complètement immergé dans un milieu donné, par deux faces parallèles aura un angle de sortie égal à son angle d'entrée. Il aura cependant subit une translation.

> ***Exemple :*** Quel sera l'angle de sortie d'un pinceau de lumière traversant un prisme rectangulaire de chlorure de sodium (n = 1,79) immergé dans l'air et ayant un angle d'incidence de 35°? Si l'épaisseur du prisme est de 2 cm, quelle sera la distance verticale entre le point d'entrée et le point de sortie du rayon lumineux?



Passage air-NaCl

$$n_1 = 1$$
$$n_2 = 1{,}79$$
$$\theta_1 = 35°$$

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$
$$\theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{n_1 \sin\theta_1}{n_2}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{1 \times \sin 35°}{1{,}79}\right)$$
$$\theta_2 = 18{,}69°$$

Passage NaCl-air

Puisque les deux faces du prisme sont parallèles, l'angle d'incidence à la deuxième face est égal à l'angle de réfraction à la première face car ces angles sont alterne-interne.

$$n_2 = 1{,}79$$
$$n_3 = 1$$
$$\theta_2 = 18{,}69°$$

$$n_2 \sin\theta_2 = n_3 \sin\theta_3$$

$$\theta_3 = \sin^{-1}\left(\frac{n_2 \sin\theta_2}{n_3}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{1{,}79 \times \sin 18{,}69°}{1}\right)$$

$$\theta_3 = 35°$$

Ainsi, l'angle de sortie est égal à l'angle d'entrée lorsque les milieux extrêmes sont identiques (ici, l'air). La direction du rayon lumineux n'est donc pas changée.

Distance verticale de translation

$$d = 2 \text{ cm}$$

$$\theta_2 = 18{,}69°$$

$$\tan\theta_2 = \frac{x}{d}$$

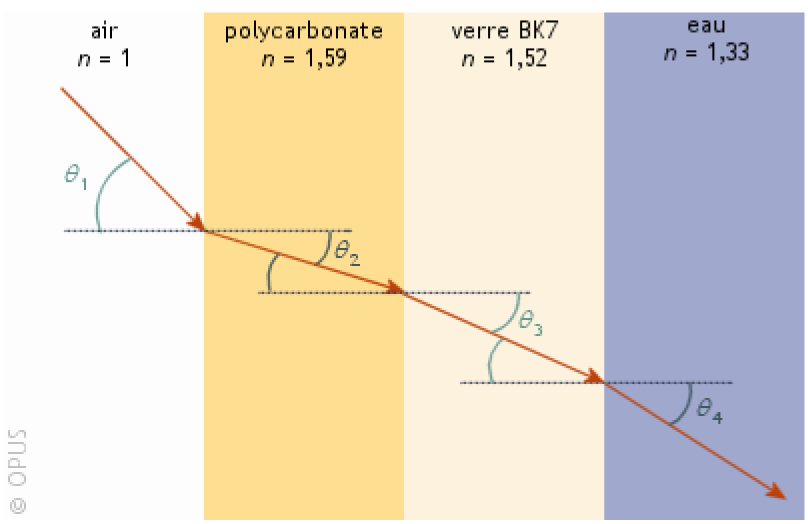
$$x = d \tan\theta_2 = 2 \text{ cm} \times \tan 18{,}69°$$

$$x = 0{,}68 \text{ cm}$$

Les milieux multiples

Le dernier cas particulier étudié ici est celui des milieux multiples. Dans ce cas, nous avons une succession de milieux d'indices de réfraction différents et dont les interfaces sont toutes parallèles. Nous verrons, avec l'exemple numérique qui suit, que seuls les milieux extrêmes et l'angle d'incidence initial influencent l'angle de sortie du pinceau lumineux.

Exemple : Considérons un cas à quatre milieux. Le premier est l'air (n = 1), le deuxième est du polycarbonate (n = 1,59), le troisième est du verre optique BK7 (n = 1,52) et le dernier est de l'eau (n = 1,33). L'angle d'incidence du pinceau lumineux à la première interface est de 40°. Quel sera l'angle de sortie du pinceau lumineux? Comparez cet angle à l'angle de réfraction pour le passage direct de l'air à l'eau.



Passage air-polycarbonate

$$n_1 = 1$$
$$n_2 = 1{,}59$$
$$\theta_1 = 40°$$

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$
$$\theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{n_1 \sin\theta_1}{n_2}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{1 \times \sin 40°}{1{,}59}\right)$$
$$\theta_2 = 23{,}85°$$

Passage polycarbonate-verre

L'angle d'incidence à l'interface polycarbonate-verre et l'angle de réfraction à l'interface air-polycarbonate sont égaux puisqu'ils sont alterne-interne.

$$n_2 = 1{,}59$$
$$n_3 = 1{,}52$$

$$n_2 \sin\theta_2 = n_3 \sin\theta_3$$
$$\theta_3 = \sin^{-1}\left(\frac{n_2 \sin\theta_2}{n_3}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{1{,}59 \times \sin 23{,}85°}{1{,}52}\right)$$
$$\theta_3 = 25{,}02°$$

Passage verre-eau

L'angle d'incidence à l'interface verre-eau et l'angle de réfraction à l'interface polycarbonate-verre sont égaux puisqu'ils sont alterne-interne.

$$n_3 = 1{,}52$$
$$n_4 = 1{,}33$$

$$n_3 \sin\theta_3 = n_4 \sin\theta_4$$
$$\theta_4 = \sin^{-1}\left(\frac{n_3 \sin\theta_3}{n_4}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{1{,}52 \times \sin 25{,}02°}{1{,}33}\right)$$
$$\theta_4 = 28{,}90°$$

Passage direct air-eau

$$n_1 = 1$$
$$n_2 = 1{,}33$$
$$\theta_1 = 40°$$

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$
$$\theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{n_1 \sin\theta_1}{n_2}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{1 \times \sin 40°}{1{,}33}\right)$$
$$\theta_2 = 28{,}90°$$

On constate donc que les milieux intermédiaires n'influencent pas l'angle final du pinceau lumineux, mais que seuls les milieux extrêmes importent.