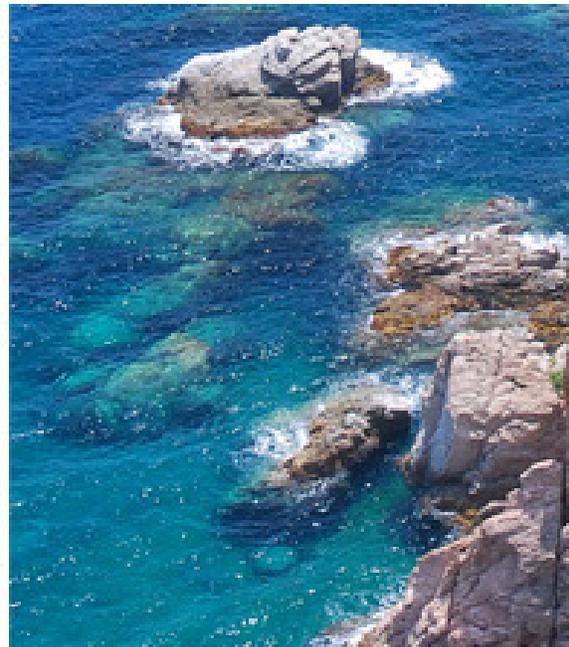
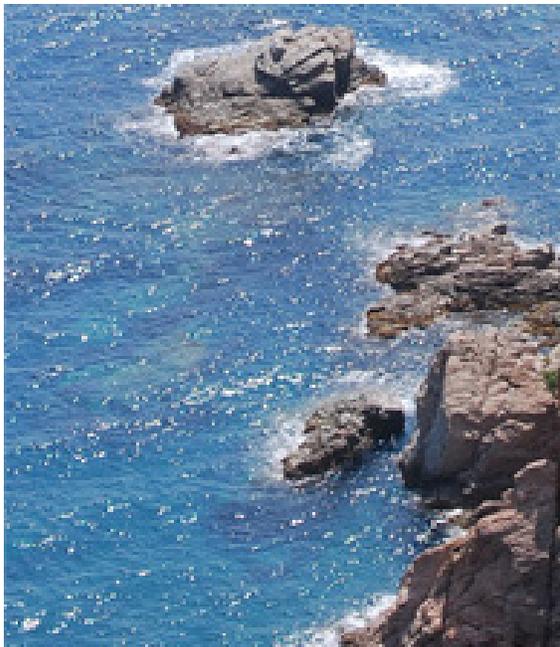


# 4 LA RÉFLEXION ET LA TRANSMISSION

*Comment peut-on bloquer les réflexions de la lumière sur la surface de l'eau pour mieux voir ce qu'il y a sur le fond de la mer ?*



[www.digital-photography-tips.net/Stay\\_Focussed-Newsletter-March-2013.html](http://www.digital-photography-tips.net/Stay_Focussed-Newsletter-March-2013.html)

**Découvrez la réponse à cette question dans ce chapitre.**

Il peut arriver qu'une onde change de milieu. Par exemple, l'onde pourrait passer d'une corde ayant une certaine masse linéique à une autre corde ayant une masse linéique différente. Dans ce chapitre, on va examiner comment change l'onde en passant d'un milieu à un autre.

## 4.1 LA FRÉQUENCE ET LA LONGUEUR D'ONDE

En changeant de milieu, la fréquence de l'onde ne peut pas changer. S'il arrive 50 oscillations par seconde à l'endroit où les milieux se rencontrent, 50 oscillations par seconde doivent aussi repartir. Il ne peut pas se perdre ou s'accumuler d'oscillations à l'endroit où les milieux se rencontrent.

### Fréquence lors d'un changement de milieu

La fréquence ne change pas en passant d'un milieu à l'autre

$$f_1 = f_2$$

Par contre, la vitesse risque d'être différente si on change de milieu, car la vitesse dépend des caractéristiques du milieu. Comme

$$f = \frac{v}{\lambda}$$

et que la fréquence reste identique, on a

$$f_1 = f_2$$

En remplaçant  $f$  par  $v/\lambda$ , on a

### Longueur d'onde lors d'un changement de milieu

$$\frac{v_1}{\lambda_1} = \frac{v_2}{\lambda_2}$$

Ainsi, si la vitesse est plus grande dans le milieu 2, la longueur d'onde sera plus grande. On peut voir ce phénomène dans le vidéo suivant.

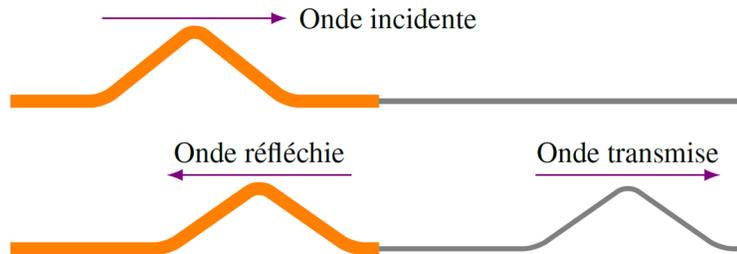
<http://www.youtube.com/watch?v=IEjdCAKubCc>

Les résultats obtenus ici sont valides pour tous les types d'onde.

## 4.2 ONDES SUR UNE CORDE

### Amplitude des ondes transmises et réfléchies

Quand une onde sur une corde change de milieu, une partie de l'onde sera transmise dans l'autre milieu et une partie de l'onde sera réfléchi.



L'amplitude des ondes transmises et réfléchies dépend des impédances des milieux. Si l'onde initiale a une amplitude  $A$ , alors les amplitudes des ondes réfléchies et transmises sont les suivantes.

#### Amplitudes des ondes réfléchies et transmises

$$A_r = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} A$$

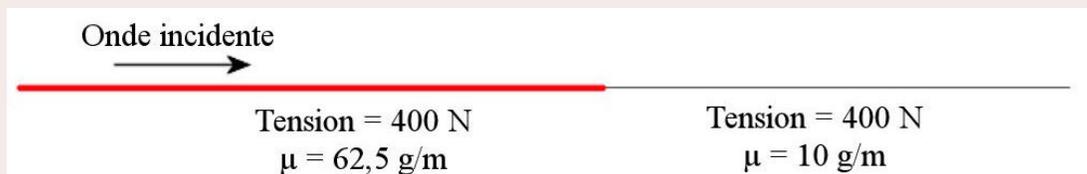
$$A_t = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} A$$

Si vous le désirez, vous pouvez voir la preuve de ces formules dans ce document.

<http://physique.merici.ca/ondes/preuveAretAt.pdf>

#### Exemple 4.1.1

Une onde sinusoïdale ayant une amplitude de 1 cm et une fréquence de 50 Hz arrive à une jonction entre deux cordes. La figure suivante nous donne les caractéristiques de deux cordes. Quelles sont les puissances des ondes incidente, réfléchi et transmise ?



La puissance d'une onde est

$$P = \frac{1}{2} Z \omega^2 A^2$$

Pour calculer les puissances, il nous faut les impédances des milieux. Ces impédances sont

$$\begin{aligned} Z_1 &= \sqrt{F_T \mu_1} & Z_2 &= \sqrt{F_T \mu_2} \\ &= \sqrt{400N \cdot 0,0625 \frac{kg}{m}} & &= \sqrt{400N \cdot 0,01 \frac{kg}{m}} \\ &= 5 \frac{kg}{s} & &= 2 \frac{kg}{s} \end{aligned}$$

Ainsi la puissance de l'onde incidente est

$$\begin{aligned} P_{incidente} &= \frac{1}{2} Z_1 \omega^2 A^2 \\ &= \frac{1}{2} \cdot 5 \frac{kg}{s} \cdot (2\pi \cdot 50Hz)^2 \cdot (0,01m)^2 \\ &= 24,67W \end{aligned}$$

Pour trouver les puissances des ondes réfléchi et transmise, il nous faut les amplitudes de ces ondes. Ces amplitudes sont

$$\begin{aligned} A_R &= \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} A & A_T &= \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} A \\ &= \frac{5 \frac{kg}{s} - 2 \frac{kg}{s}}{5 \frac{kg}{s} + 2 \frac{kg}{s}} \cdot 1cm & &= \frac{2 \cdot 5 \frac{kg}{s}}{5 \frac{kg}{s} + 2 \frac{kg}{s}} \cdot 1cm \\ &= 0,429cm & &= 1,429cm \end{aligned}$$

Ça peut sembler bizarre que l'onde transmise ait une plus grande amplitude que l'onde incidente, mais c'est possible. Comme le milieu 2 a une impédance plus petite, l'effet que l'onde a sur ce milieu est plus grand même si la puissance de l'onde est plus petite.

Ainsi, la puissance de l'onde réfléchi est

$$\begin{aligned} P_R &= \frac{1}{2} Z_1 \omega^2 A_R^2 \\ &= \frac{1}{2} \cdot 5 \frac{kg}{s} \cdot (2\pi \cdot 50Hz)^2 \cdot (0,00429m)^2 \\ &= 4,53W \end{aligned}$$

et la puissance de l'onde transmise est

$$\begin{aligned} P_T &= \frac{1}{2} Z_2 \omega^2 A_T^2 \\ &= \frac{1}{2} \cdot 2 \frac{kg}{s} \cdot (2\pi \cdot 50Hz)^2 \cdot (0,01429m)^2 \\ &= 20,14W \end{aligned}$$

On remarque que la somme des puissances de l'onde réfléchie et de l'onde transmise est égale à la puissance de l'onde incidente. Ce sera évidemment toujours le cas. Dans cet exemple, 81,6 % de l'énergie est transmise et 18,4 % de l'énergie de l'onde est réfléchie.

## Réflexion et transmission selon la différence d'impédance

### Impédances très différentes

Examinons ce qui arrive si l'impédance  $Z_1$  est beaucoup plus grande que l'impédance  $Z_2$ . On a alors

$$A_R = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} A \approx \frac{Z_1}{Z_1} A = A$$

L'onde réfléchie a pratiquement la même amplitude que l'onde initiale. Cela signifie que presque toute l'énergie de l'onde initiale s'est réfléchie et qu'il y a très peu d'énergie dans l'onde transmise. L'onde est donc presque entièrement réfléchie.

Si l'impédance  $Z_1$  est beaucoup plus petite que l'impédance  $Z_2$ , on a alors

$$A_R = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} A \approx \frac{-Z_2}{Z_2} A = -A$$

L'onde réfléchie a pratiquement la même amplitude que l'onde incidente. (On s'occupera de la signification du signe négatif un peu plus loin.) Encore une fois, cela signifie qu'il y a beaucoup de réflexion et qu'il n'y a pratiquement pas d'énergie dans l'onde transmise.

### Impédances ayant des valeurs près l'une de l'autre

Si l'impédance  $Z_1$  est presque identique à l'impédance  $Z_2$ , on a alors

$$A_R = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} A \approx 0$$

Dans ce cas, il n'y a pas d'onde réfléchie et l'onde se transmet au complet dans l'autre milieu.

C'est ce qu'on appelle l'« impedance matching ». Par exemple, on peut arriver à cette situation avec des cordes ayant la même tension et faites de matériaux différents, mais ayant des masses linéiques identiques. C'est un concept très important dans les circuits électriques avec des ondes de courants (courants alternatifs). Si les impédances sont identiques, il n'y aura pas de réflexion de signal. Cela se produit, par exemple, si vous

branchez des hautparleurs à votre chaîne stéréo. L'amplificateur, qui a une certaine impédance, envoie des signaux vers les hautparleurs, qui ont aussi une certaine impédance. Si l'impédance n'est pas la même, il y aura des réflexions du signal entre le récepteur et les hautparleurs, ce qui se traduira par un écho dans le son. Il faut donc choisir des hautparleurs avec la bonne impédance. Les valeurs d'impédance sont indiquées derrière votre amplificateur et vos hautparleurs.

Résumons nos résultats.

### Règles pour la réflexion et la transmission.

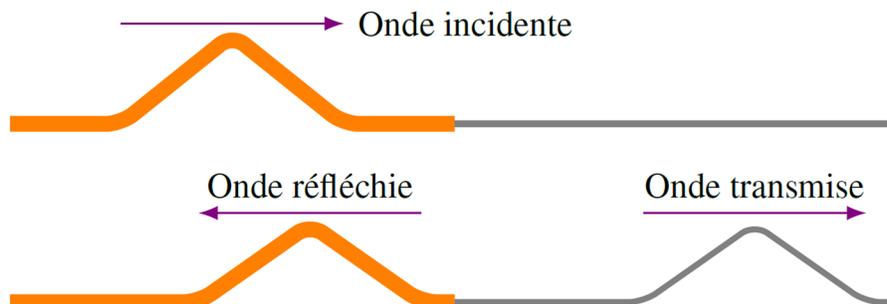
Plus l'impédance des milieux est différente, plus la réflexion sera grande et plus la transmission sera petite.

Si les impédances des milieux sont identiques, l'onde est complètement transmise et il n'y a pas de réflexion.

### Inversion de l'onde réfléchi

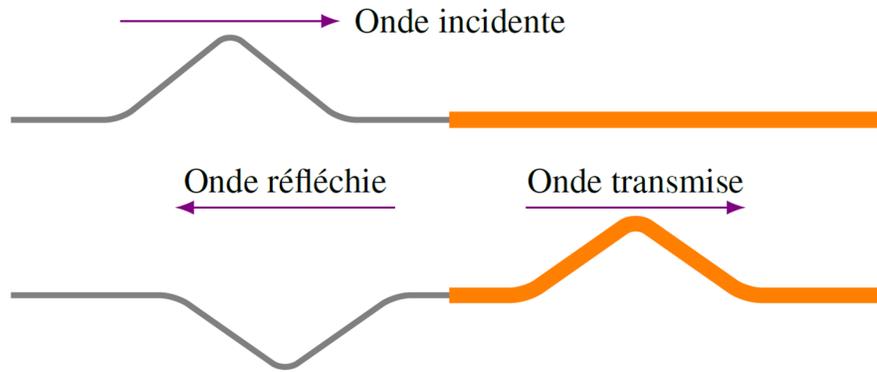
Que signifiait le signe négatif devant l'amplitude de l'onde réfléchi quand  $Z_2$  est plus grande que  $Z_1$ ? Ce signe signifie que l'onde réfléchi est inversée par rapport à l'onde incidente. Ce n'est pas si évident à constater avec une onde sinusoïdale, mais c'est assez facile avec une onde qui est formée d'une seule bosse.

Si l'impédance  $Z_1$  est plus grande que  $Z_2$ , l'amplitude de l'onde réfléchi est positive et on a la situation suivante.



L'onde réfléchi est dans le même sens que l'onde incidente.

Si l'impédance  $Z_1$  est plus petite que  $Z_2$ , l'amplitude de l'onde réfléchi est négative et on a la situation montrée sur la figure.



L'onde réfléchie est dans le sens inverse par rapport à l'onde incidente.

L'amplitude de l'onde transmise ne pouvant jamais être négative, elle n'est jamais inversée par rapport à l'onde incidente.

### Règles pour la réflexion et la transmission

L'onde passe du milieu 1 (impédance  $Z_1$ ) au milieu 2 (impédance  $Z_2$ ).

Si  $Z_2 > Z_1$ , l'onde réfléchie est inversée.

Si  $Z_2 < Z_1$ , l'onde réfléchie n'est pas inversée.

L'onde transmise n'est jamais inversée.

Voyons ce que ça donne pour des ondes dans des cordes. Dans ce cas, l'impédance est

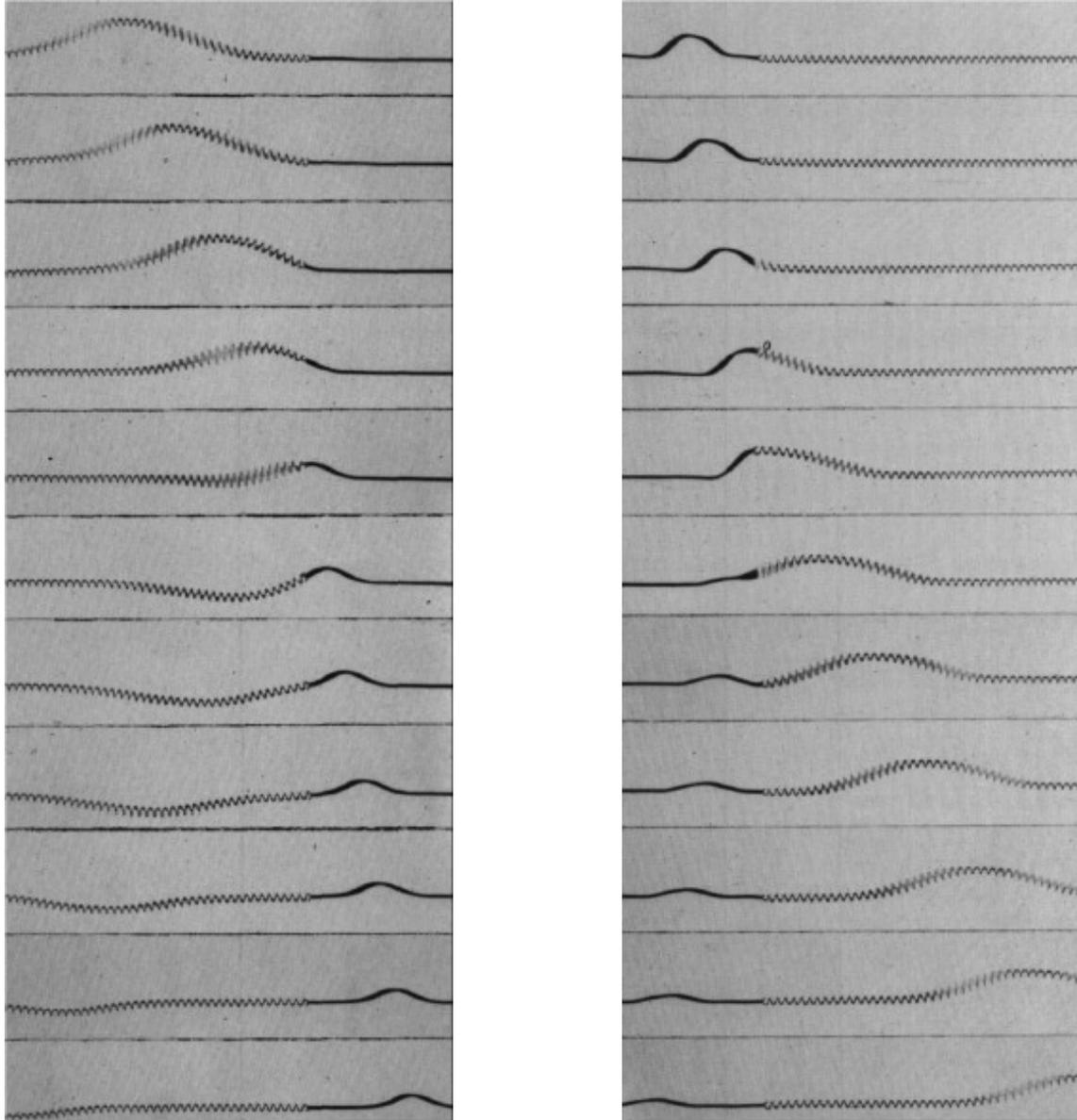
$$Z = \frac{F_T}{v} = \sqrt{F_T \mu}$$

Généralement, les tensions de cordes bout à bout sont les mêmes et seule la masse linéique est différente. On remarque alors que l'impédance est plus grande si la masse linéique est plus grande ou si la vitesse de l'onde est plus petite. Les règles d'inversion de l'onde réfléchie deviennent alors

Si  $\mu_2 > \mu_1$  ou si  $v_2 < v_1$ , l'onde réfléchie est inversée.

Si  $\mu_2 < \mu_1$  ou si  $v_2 > v_1$ , l'onde réfléchie n'est pas inversée.

Dans ces images, une onde se propage dans deux ressorts tendus (qui agissent comme des cordes) attachés bout à bout. Le ressort plus gros a une masse linéique plus petite que le ressort plus petit. (Oui oui, vous avez bien lu. Le petit est peut-être en métal alors que le gros est peut-être en plastique.) L'impédance du gros ressort est donc plus petite que celle du petit ressort.



Haber-Schaim, Cross, Dodge, Walter, Tougas, Physique PSSC, éditions CEC, 1974

Dans la série d'images de gauche, l'onde arrive dans le milieu d'impédance plus petite et tente d'aller dans le milieu avec une impédance plus grande. Il y a une onde transmise, qui est dans le même sens que l'onde qui arrivait dans le milieu 1. Il y a également une onde réfléchie, qui est inversée puisque l'impédance du milieu 2 est plus grande que celle du milieu 1. On peut remarquer que la vitesse de l'onde est plus petite dans le milieu 2, ce qui nous indique que l'impédance du milieu 2 est plus grande.

Dans la série d'images de droite, l'onde arrive cette fois dans le milieu d'impédance plus grande et tente d'aller dans le milieu avec une impédance plus petite. L'onde transmise est encore une fois dans le même sens que l'onde qui arrivait dans le milieu 1. L'onde réfléchie est aussi dans le même sens puisque l'impédance du milieu 2 est plus petite que celle du

milieu 1. On remarque ici que la vitesse dans le milieu 2 est plus grande que dans le milieu 1, ce qui confirme que l'impédance du milieu 2 est plus petite que celle du milieu 1.

## L'onde arrive au bout d'une corde

Les formules d'amplitude de l'onde réfléchie nous permettront de déterminer ce qui arrive quand une onde arrive au bout d'une corde.

### Corde fixée au bout

Une onde se déplace le long d'une corde dont le bout est solidement fixé à quelque chose. Quand l'onde arrive au bout de la corde, il se passe la même chose qui se passe quand l'onde change de milieu. Ici, les deux milieux sont la corde et l'objet sur lequel la corde est attachée. Cet objet étant fixe, il ne sera pas perturbé du tout par le mouvement de la corde, ce qui signifie que cet objet se comporte comme un milieu avec une impédance énorme. On revient donc à notre situation où  $Z_2$  est beaucoup plus grand que  $Z_1$ . On avait alors trouvé que l'amplitude de l'onde réfléchie est de  $-A$ , ce qui signifie que l'onde est totalement réfléchie, mais qu'elle est inversée. On a donc la situation suivante.



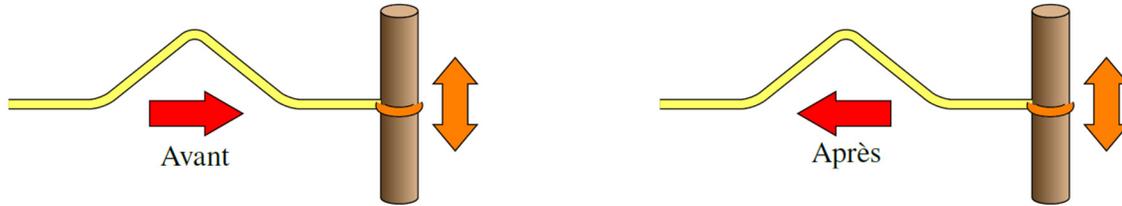
En voici une démonstration expérimentale.

<http://www.youtube.com/watch?v=LTWHxZ6Jvjs>

Cette onde est inversée, car en arrivant au bout de la corde, la corde tire sur le point d'attache vers le haut. Selon la troisième loi de Newton, le point d'attache tire alors sur la corde vers le bas, ce qui crée l'onde vers le bas qui repart vers la gauche.

### Corde libre au bout

Imaginons maintenant que la corde n'est pas fixée au bout ou qu'elle est fixée à une tige par un anneau très peu massif pouvant glisser sans aucune friction. Alors, c'est comme si elle tentait de passer dans une corde dont la masse linéique est nulle, donc qui a une impédance nulle. On revient donc à notre situation où  $Z_2$  est beaucoup plus petit que  $Z_1$ . On avait alors trouvé que l'amplitude de l'onde réfléchie est de  $A$ , ce qui signifie que l'onde est totalement réfléchie et qu'elle n'est pas inversée. On a donc la situation suivante.



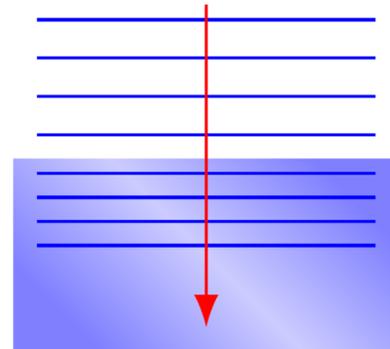
En voici une démonstration.

<http://www.youtube.com/watch?v=aVCqg5AkePI>

Dans ce cas-ci, quand l'onde arrive au bout, le bout de la corde monte beaucoup plus haut que prévu, car il y a deux fois moins de tension sur le dernier morceau de corde. Habituellement, chaque morceau de corde est ramené à sa position d'équilibre par les tensions de chaque côté du morceau. Cependant, il n'y a que la tension d'un seul côté qui s'exerce sur le dernier morceau de corde. Ce manque de tension fait que ce dernier morceau monte plus haut que prévu, ce qui va exercer une force vers le haut sur le reste de la corde. C'est cette force vers le haut qui crée une nouvelle onde vers le haut allant vers la gauche.

## 4.3 ONDES ARRIVANT PERPENDICULAIREMENT À UNE SURFACE

On va maintenant examiner des ondes comme le son et la lumière qui arrivent sur la surface à un angle de  $90^\circ$ , comme sur la figure de droite.



### Ondes sonores

Les amplitudes de ces ondes réfléchi et transmise sont données par les mêmes formules que pour les ondes dans une corde.

$$A_R = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} A$$

$$A_T = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} A$$

Si vous le désirez, vous pouvez voir la preuve de ces formules dans ce document <http://physique.merici.ca/ondes/preuveAretAt2.pdf>

(Il y a un petit changement par rapport à la preuve de la section précédente puisqu'on travaille avec l'intensité de l'onde plutôt que la puissance.)

### Exemple 4.3.1

Un son de 1000 Hz et ayant une intensité de 100 dB dans l'air entre dans l'eau. Quelle est l'intensité du son dans l'eau (en décibel) ? Utilisez les données suivantes.

Air : vitesse de l'onde = 340 m/s

masse volumique = 1,2 kg/m<sup>3</sup>

Eau : vitesse de l'onde = 1450 m/s

masse volumique = 1000 kg/m<sup>3</sup>

On pourra trouver l'intensité de l'onde transmise dans l'eau à partir de l'amplitude de l'onde dans l'eau avec

$$I = \frac{1}{2} Z \omega^2 A^2$$

Pour calculer l'intensité, il nous faudra les impédances des milieux. Ces impédances sont

$$Z_1 = \rho_1 v_1$$

$$Z_2 = \rho_2 v_2$$

$$= 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$= 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1450 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$= 408 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}}$$

$$= 1\,450\,000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}}$$

Aussi, on doit connaître l'amplitude de l'onde dans l'eau. Celle-ci se trouve à partir de l'amplitude de l'onde initiale et des impédances des milieux.

#### Amplitude de l'onde initiale

Avec une intensité de 100 dB, l'intensité de l'onde est de

$$\beta = 10 \text{dB} \cdot \log \frac{I}{10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$$

$$100 \text{dB} = 10 \text{dB} \cdot \log \frac{I}{10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$$

$$I = 0,01 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

L'amplitude de l'onde est donc de

$$I = \frac{1}{2} Z_1 \omega^2 A^2$$

$$0,01 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = \frac{1}{2} \cdot 408 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}} \cdot (2\pi \cdot 1000 \text{Hz})^2 \cdot A^2$$

$$A = 1,114 \times 10^{-6} \text{ m}$$

Amplitude de l'onde transmise

L'amplitude de l'onde transmise est donc

$$\begin{aligned} A_T &= \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} A \\ &= \frac{2 \cdot 408 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}}}{408 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}} + 1\,450\,000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}}} \cdot 1,114 \times 10^{-6} \text{ m} \\ &= 6,267 \times 10^{-10} \text{ m} \end{aligned}$$

Intensité de l'onde transmise

L'intensité de cette onde dans l'eau est donc de

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{2} Z_2 \omega^2 A^2 \\ &= \frac{1}{2} \cdot 1\,450\,000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}} \cdot (2\pi \cdot 1000 \text{ Hz})^2 \cdot (6,267 \times 10^{-10} \text{ m})^2 \\ &= 1,125 \times 10^{-5} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \end{aligned}$$

En décibel, cette intensité est de

$$\begin{aligned} \beta &= 10\text{dB} \cdot \log \frac{I}{10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} \\ &= 10\text{dB} \cdot \log \frac{1,124 \times 10^{-5} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} \\ &= 70,5\text{dB} \end{aligned}$$

Le son a beaucoup de difficulté à passer de l'air à l'eau ou de l'eau à l'air puisqu'à 20 °C, l'impédance de l'air est de 413 kg/m<sup>2</sup>s et l'impédance de l'eau est 1 439 000 kg/m<sup>2</sup>s. Cette énorme différence d'impédance fait en sorte que presque toute l'énergie de l'onde se reflète et il n'y a pratiquement pas de transmission.

Si vous allez passer une échographie, on va mettre du gel sur votre bedaine. Ce gel n'est pas là simplement pour que ça glisse bien, il est là pour éviter que l'onde se réfléchisse. S'il n'y avait pas ce gel, l'onde devrait passer de la machine, à l'air puis à la bedaine. Il y aurait alors des changements importants d'impédance à chaque changement de milieu et donc beaucoup de réflexions. Ainsi, très peu d'ondes pourraient entrer dans la personne. Avec le gel, les variations d'impédance sont beaucoup moins importantes et beaucoup plus d'ondes peuvent pénétrer dans la personne.

La différence d'impédance pour les ondes sonores est encore plus grande entre l'air et l'acier (4 000 000 Ns/m<sup>2</sup>), ce qui signifie que le son se propageant dans un morceau de métal aura beaucoup de difficulté à sortir du métal pour aller dans l'air. C'est pour ça qu'on

peut, semble-t-il, entendre le train arriver bien avant de le voir en écoutant avec l'oreille collée sur les rails. Le son fait par les chocs des roues du train sur les rails se propage dans les rails et ne peut presque pas se dissiper dans l'air à cause de la trop grande différence d'impédance entre les milieux. Le son voyage donc très loin dans les rails avant de se dissiper.

Il existe une superbe démonstration des effets de l'impédance du milieu, mais elle est habituellement utilisée, à tort, pour démontrer autre chose : c'est la démonstration de la sonnette dans une cloche de verre. Quand on fait sonner la sonnette dans la cloche emplies d'air, on l'entend. Quand on la fait sonner et que le vide a été fait, on ne l'entend plus.

<http://www.youtube.com/watch?v=ce7AMJdq0Gw>

On utilise habituellement cette expérience pour montrer que le son ne peut pas se propager dans le vide. C'est vrai que le son a besoin d'un milieu pour se propager. Dans le vide, il n'y a donc pas de son (contrairement à ce qu'on peut voir dans tous les films de science-fiction, à l'exception de *2001, odyssée de l'espace*). Toutefois, ce n'est pas ce que montre cette expérience. Même si la pompe enlève 99 % de l'air, il en reste suffisamment pour que le son puisse se propager. Voici plutôt ce qui se passe : en diminuant la densité de l'air, on diminue l'impédance de l'air dans la cloche et elle devient de plus en plus différente de celle de l'air à l'extérieur de la cloche et de la cloche de verre. À mesure qu'on fait le vide, le son a donc de plus en plus de difficulté à sortir de la cloche et est de plus en plus réfléchi à l'intérieur de la cloche, ce qui nous donne un son dont l'intensité diminue graduellement, tel qu'on peut l'observer dans le vidéo.

## La lumière

### Longueur d'onde

Avec la lumière, on peut aller un peu plus loin. Puisque la fréquence ne change pas en passant d'un milieu à l'autre, on a

$$\begin{aligned} f_{\text{vide}} &= f_{\text{substance}} \\ \frac{v_{\text{vide}}}{\lambda_{\text{vide}}} &= \frac{v_{\text{substance}}}{\lambda_{\text{substance}}} \\ \frac{c}{\lambda_{\text{vide}}} &= \frac{c/n}{\lambda_{\text{substance}}} \end{aligned}$$

(On a utilisé  $v = c/n$  pour la dernière ligne.) On arrive alors à

### Changement de longueur d'onde dans une substance transparente

$$\lambda_{\text{substance}} = \frac{\lambda_{\text{vide}}}{n}$$

Les amplitudes

Pour la lumière, les formules des amplitudes des ondes réfléchi et transmise sont un peu semblables à ce qu'on avait pour le son, sauf que c'est l'indice de réfraction qui joue le rôle de l'impédance. On a alors les formules suivantes.

**Amplitudes des ondes réfléchi et transmise pour la lumière**

$$E_{0R} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} E_0$$

$$E_{0T} = \frac{2n_1}{n_1 + n_2} E_0$$

Si vous le désirez, vous pouvez voir la preuve de ces formules dans ce document.

<http://physique.merici.ca/ondes/preuveAretAt3.pdf>

**Exemple 4.3.2**

La longueur d'onde de la lumière passant du verre à l'air change de 430 nm à 623,5 nm. L'intensité lumineuse dans le verre est de 0,1 W/m<sup>2</sup>.



- a) Quel est l'indice de réfraction du verre ?

Puisque la longueur d'onde dans l'air est de 623,5 nm, on a

$$\lambda_{\text{substance}} = \frac{\lambda_{\text{vide}}}{n}$$

$$430\text{nm} = \frac{623,5\text{nm}}{n}$$

$$n = 1,45$$

- b) Quelle est la vitesse de la lumière dans le verre ?

La vitesse est

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

$$= \frac{3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1,45}$$

$$= 2,069 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

c) Quelles sont les intensités des ondes réfléchi et transmise ?

On trouve l'amplitude de l'onde incidente avec la formule suivante.

$$I = \frac{cn\epsilon_0 E_0^2}{2}$$

$$0,1 \frac{W}{m^2} = \frac{3 \times 10^8 \frac{m}{s} \cdot 1,45 \cdot 8,854 \times 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2} \cdot E_0^2}{2}$$

$$E_0 = 7,206 \frac{N}{C}$$

Ainsi, les amplitudes des ondes réfléchi et transmise sont

$$E_{0R} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} E_0$$

$$E_{0T} = \frac{2n_1}{n_1 + n_2} E_0$$

$$= \frac{1,45 - 1}{1,45 + 1} \cdot 7,206 \frac{N}{C}$$

$$= \frac{2 \cdot 1,45}{1,45 + 1} \cdot 7,206 \frac{N}{C}$$

$$= 1,324 \frac{N}{C}$$

$$= 8,530 \frac{N}{C}$$

Cela signifie que les intensités des ondes transmise et réfléchi sont

$$I_R = \frac{cn\epsilon_0 E_{0R}^2}{2}$$

$$= \frac{3 \times 10^8 \frac{m}{s} \cdot 1,45 \cdot 8,854 \times 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2} \cdot \left(1,324 \frac{N}{C}\right)^2}{2}$$

$$= 0,00337 \frac{W}{m^2}$$

$$I_T = \frac{cn\epsilon_0 E_{0T}^2}{2}$$

$$= \frac{3 \times 10^8 \frac{m}{s} \cdot 1,45 \cdot 8,854 \times 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2} \cdot \left(8,530 \frac{N}{C}\right)^2}{2}$$

$$= 0,0966 \frac{W}{m^2}$$

Donc 96,6 % de l'énergie est transmise.

Notez que, puisque l'indice de réfraction joue le rôle de l'impédance avec la lumière, les règles d'inversion de l'onde deviennent les règles suivantes pour la lumière.

### Règles pour la réflexion et la transmission de la lumière

L'onde passe du milieu 1 (indice  $n_1$ ) au milieu 2 (indice  $n_2$ ).

Si  $n_2 > n_1$ , l'onde réfléchi sera inversée.

Si  $n_2 < n_1$ , l'onde réfléchi ne sera pas inversée.

L'onde transmise n'est jamais inversée.

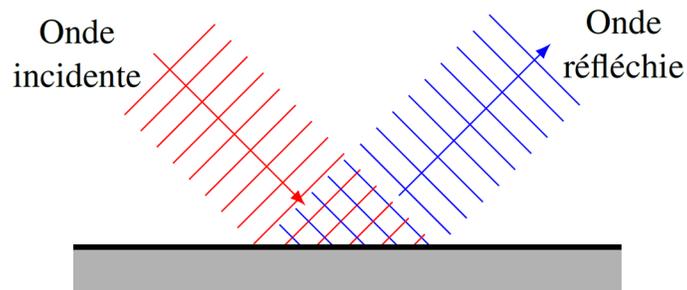
Si l'onde se réfléchit sur un métal, c'est comme si l'onde se réfléchit sur un milieu dont l'indice est infini. L'onde est entièrement réfléchi et est inversée.

## 4.4 LA LOI DE LA RÉFLEXION

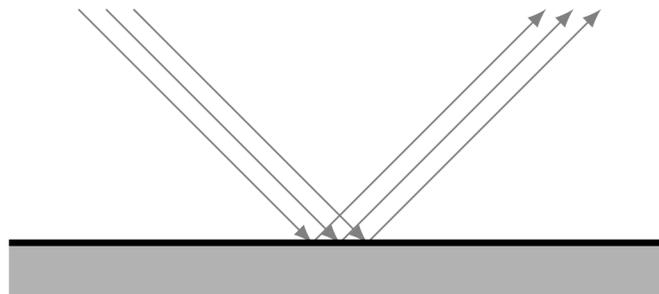
On va maintenant examiner ce qui se produit si l'onde n'arrive pas perpendiculairement à la surface.

Nous ne donnerons pas les formules des amplitudes des ondes réfléchi et transmise si l'onde arrive ainsi avec un certain angle à une interface. Ces formules sont un peu plus complexes que les formules quand l'onde arrive perpendiculairement à la surface, spécialement dans le cas de la lumière.

On va premièrement se concentrer sur l'onde réfléchi.

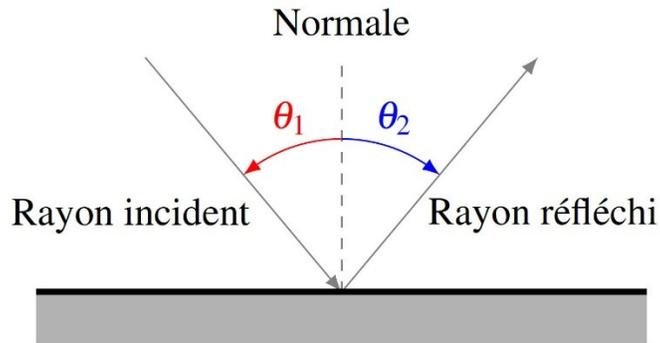


Ici, nous n'allons pas suivre l'onde avec les fronts d'onde. Nous allons suivre le déplacement de l'onde avec des lignes montrant la direction de propagation de l'onde, c'est-à-dire les rayons. On a alors cette représentation d'une réflexion.



Notez que ces rayons sont perpendiculaires aux fronts d'onde. On pourrait donc facilement ajouter les fronts d'onde à la représentation de l'onde si on voulait les ajouter.

Quand une onde se réfléchit, on a un rayon incident et un rayon réfléchi. On donne la direction de ces rayons en mesurant l'angle entre le rayon et la normale à la surface.



On sait depuis très longtemps (au moins depuis Héron d'Alexandrie qui vivait au 1<sup>er</sup> siècle après J.-C.) que le lien entre les angles des rayons incident et réfléchi est

### Loi de la réflexion

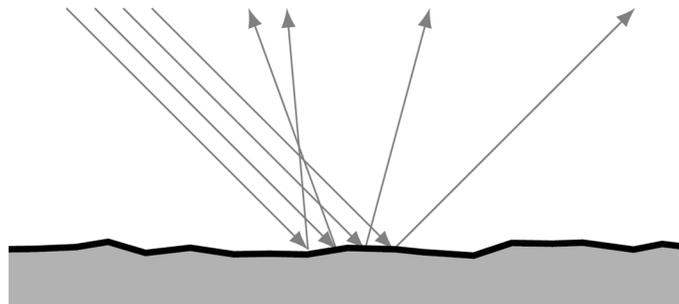
$$\theta_1 = \theta_2$$

Vous pouvez voir ici une démonstration expérimentale de cette loi avec de la lumière.

<http://www.youtube.com/watch?v=5wrQchqecjA>

Cette loi est vraie uniquement si la surface est très lisse (aspérités beaucoup plus petites que la longueur d'onde). C'est la réflexion spéculaire (qui vient de *speculum*, qui veut dire *miroir* en latin).

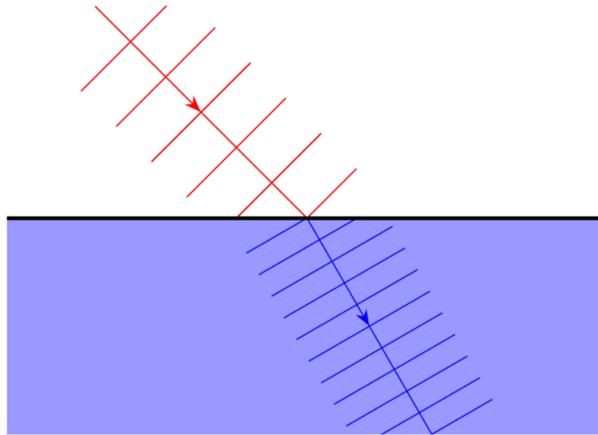
Si la surface n'est pas lisse (aspérités plus grandes que la longueur d'onde), la lumière sera réfléchie dans toutes les directions. C'est la réflexion diffuse.



## 4.5 LA LOI DE LA RÉFRACTION

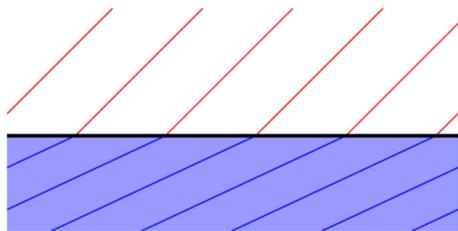
### Formule générale

On va maintenant se concentrer sur l'onde transmise. Prenons cet exemple où la vitesse de l'onde est plus petite dans le deuxième milieu.



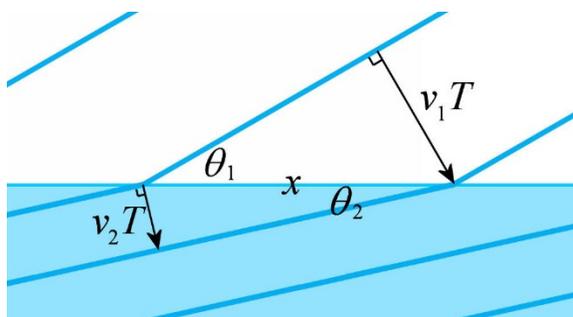
On constate que le passage de l'onde dans le deuxième milieu entraîne un changement de la direction de propagation de l'onde. Tentons de comprendre pourquoi.

Puisque la vitesse est plus petite dans le deuxième milieu, l'onde parcourt une distance plus petite dans le deuxième milieu pendant un certain temps. Le côté de front d'onde qui est dans le 2<sup>e</sup> milieu avance donc moins vite que le côté qui est dans le premier milieu. Ce côté qui va moins vite prend donc du retard par rapport à l'autre partie, ce qui change l'orientation du front d'onde. Puisque la direction de propagation est perpendiculaire au front d'onde, cela change la direction de propagation de l'onde.



On peut voir ce changement de direction dans ce video.

<https://www.youtube.com/watch?v=Bf1k9-4bb4w>



Calculons maintenant le changement d'orientation de l'onde. Pendant une période, l'onde va avancer de la distance  $vT$ , qui est aussi la longueur d'onde. Puisque la vitesse est plus petite dans le deuxième milieu, l'onde parcourt une distance plus petite dans le deuxième milieu, ce qui signifie que la longueur d'onde est plus petite dans le 2<sup>e</sup> milieu.

Selon la figure, on a donc

$$\sin \theta_1 = \frac{v_1 T}{x} \quad \text{et} \quad \sin \theta_2 = \frac{v_2 T}{x}$$

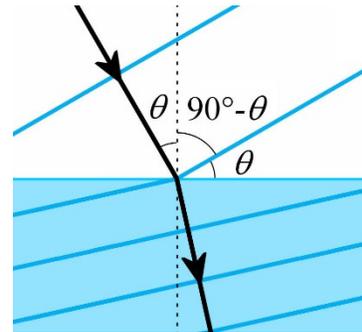
Les indices 1 font référence au milieu où est initialement l'onde et les indices 2 font référence au milieu où l'onde va passer (ou tente de passer).

En divisant l'un par l'autre, on obtient

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

Rappelons-nous maintenant que la direction de propagation de l'onde est perpendiculaire au front d'onde et que cette direction de propagation correspond aussi à l'orientation des rayons.

L'angle que fait le front d'onde avec la surface correspond à l'angle entre la direction du rayon et la normale, ce qu'on peut voir assez facilement sur la figure de droite.

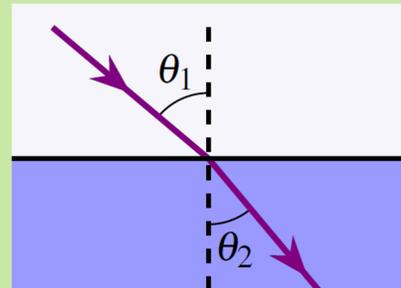


Le changement d'angle de la direction de propagation des rayons est donc le même que le changement de l'angle d'orientation des fronts d'onde.

On a donc la loi suivante donnant le changement d'angle entre les rayons et la normale.

### Loi de la réfraction

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$



## La loi de la réfraction pour la lumière

### Formule de la réfraction

Dans le cas de la lumière, la vitesse est donnée par

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

On a donc

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2}$$

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

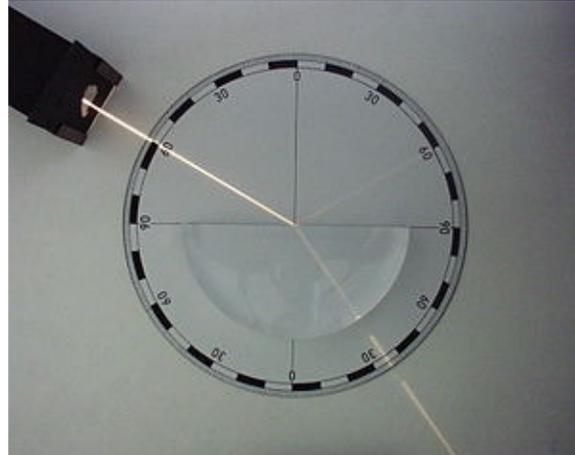
On arrive alors à

### Loi de la réfraction pour la lumière

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

On comprend maintenant pourquoi  $n$  s'appelle l'indice de réfraction. C'est parce qu'il a fait sa première apparition dans cette loi.

On voit bien ici ce changement dans la direction de propagation quand la lumière passe d'un milieu à un autre.



en.wikipedia.org/wiki/Refraction

En voici une démonstration expérimentale.

<http://www.youtube.com/watch?v=yfawFJCRDSE>

Examiner bien la photo qui montre la réfraction et le vidéo : il y a aussi une réflexion de la lumière sur l'interface. N'oubliez pas qu'on peut avoir de la réflexion **et** de la réfraction quand la lumière arrive à un changement de milieu.

### Théorie ondulatoire et corpusculaire

La réfraction de la lumière est connue depuis longtemps puisqu'on a des tables donnant les valeurs des angles avant et après l'entrée de la lumière dans l'eau faites par Ptolémée (1<sup>er</sup> siècle), bien que les valeurs ne soient pas toujours bonnes. Il fallut attendre un certain temps avant qu'on découvre la loi qui relie les angles  $\theta_1$  et  $\theta_2$ . Elle fut donnée pour la première fois par Ibn Sahl, un savant musulman, en 984. Elle fut redécouverte ensuite par Thomas Harriot en 1602, par Willebrord Snell en 1621 et par René Descartes en 1637. (Comme Harriot et Snell ne publièrent pas immédiatement leurs résultats, il existe une certaine controverse concernant le nom de cette loi. Pour tous, sauf les Français, on parle de la loi de Snell, alors que pour les Français, on parle de la loi de Snell-Descartes ou même carrément de la loi de Descartes...)

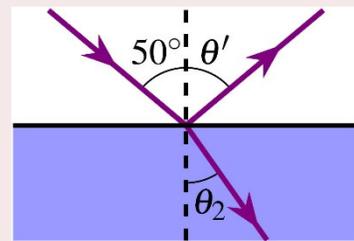
Une des premières preuves de la loi de la réfraction fut faite par Descartes en 1637, mais elle était basée sur la théorie corpusculaire de la lumière. (Descartes a donné cette preuve même s'il ne pensait pas que la lumière était une particule. Il pensait plutôt que la lumière était une propagation instantanée d'une variation de pression dans l'éther.) Pour arriver à la bonne loi avec la théorie corpusculaire, Descartes devait supposer que la lumière allait plus vite si l'indice de réfraction est plus grand (alors que c'est le contraire de ce qu'on a avec la théorie ondulatoire.) Christiaan Huygens fut le premier, en 1678, à donner une

preuve de la loi de la réfraction à partir de la théorie ondulatoire de la lumière (c'est essentiellement la preuve qu'on a donnée ici).

On pourrait penser que la mesure de la vitesse de la lumière dans l'eau aurait été un test facile pour déterminer quelle théorie était correcte. Il aurait suffi de mesurer la vitesse de la lumière dans l'eau et dans l'air. Si elle va plus vite dans l'eau, la théorie corpusculaire est correcte et si elle va moins vite dans l'eau, la théorie ondulatoire est correcte. Toutefois, on ne parvint à mesurer la vitesse de la lumière dans l'eau qu'en 1850, alors que la théorie ondulatoire était déjà la seule acceptée depuis une vingtaine d'années. Et même si on était parvenu à faire cette mesure plus tôt, elle n'aurait pas vraiment permis de choisir entre les 2 théories puisqu'on peut très facilement développer une théorie corpusculaire dans laquelle la lumière va moins vite dans l'eau.

### Exemple 4.5.1

Un rayon lumineux ayant une longueur d'onde de 500 nm dans l'air entre dans l'eau ( $n = 1,33$ ) avec un angle d'incidence de  $50^\circ$ .



- a) Quel est l'angle du rayon réfléchi ?

Selon la loi de la réflexion, on a

$$\theta' = 50^\circ$$

- b) Quel est l'angle du rayon réfracté ?

Selon la loi de la réfraction, on a

$$\begin{aligned} n_1 \sin \theta_1 &= n_2 \sin \theta_2 \\ 1 \cdot \sin 50^\circ &= 1,33 \cdot \sin \theta_2 \\ \theta_2 &= 35,16^\circ \end{aligned}$$

- c) Quelle est la longueur d'onde de la lumière dans l'eau ?

La longueur d'onde est

$$\begin{aligned} \lambda_{eau} &= \frac{\lambda_{vide}}{n} \\ &= \frac{500nm}{1,33} \\ &= 376nm \end{aligned}$$

(Cela ne veut pas dire que la couleur de la lumière change. Les couleurs en fonction de la longueur d'onde sont données pour des longueurs d'onde dans le vide. Ce que notre œil mesure en réalité, c'est la fréquence. Comme la fréquence ne change pas en changeant de milieu, la couleur reste la même.)

## 4.6 LE PRINCIPE DE FERMAT

En 1657, Pierre de Fermat formulait le principe suivant.

### Principe de Fermat

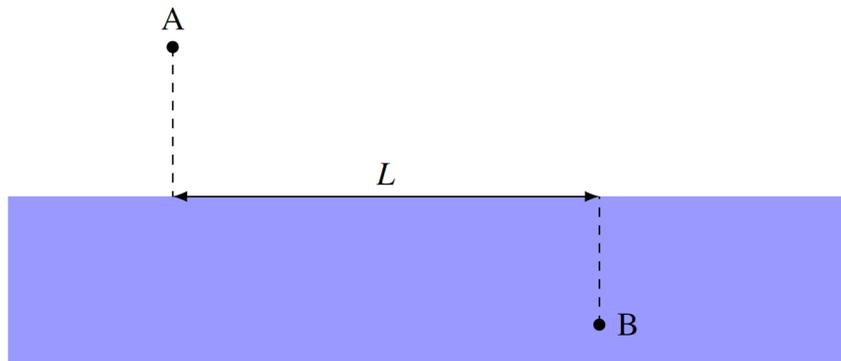
En passant d'un point à un autre, la lumière prend toujours le chemin qui prend le moins de temps.

(Fermat formula ce principe pour la lumière, mais il est valide pour tous les types d'ondes.)

Ce principe peut être parfois très utile et il mène directement aux lois de la réflexion et de la réfraction.

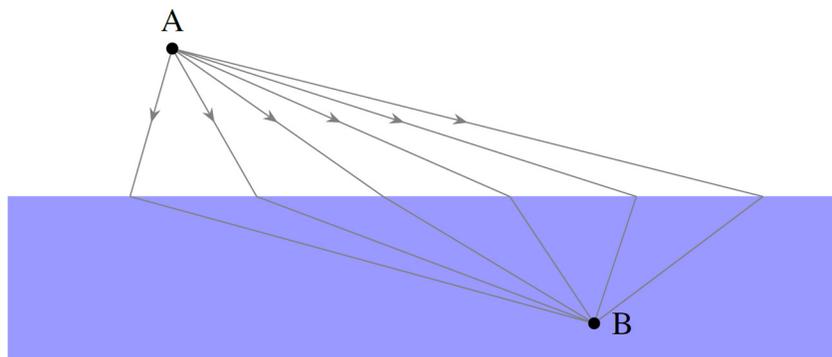
### Loi de la réfraction à partir du principe de Fermat

Imaginons que la lumière va du point A au point B dans la situation illustrée sur la figure. La distance horizontale entre les points A et B est  $L$ .

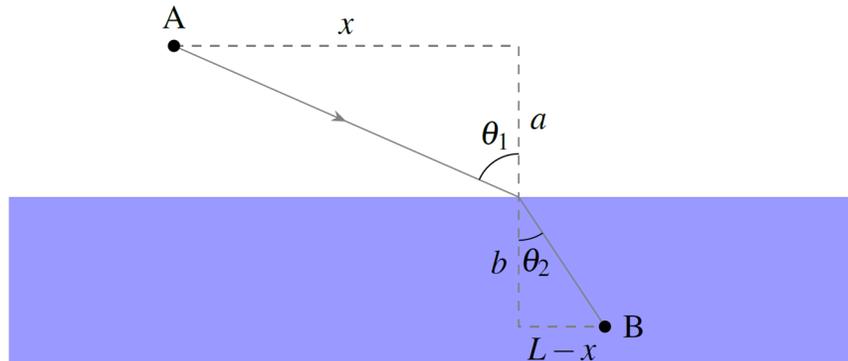


On va maintenant montrer que la trajectoire qui est parcourue le plus rapidement par la lumière pour aller de A à B est celle qui respecte la loi de la réfraction.

La lumière va dévier uniquement en changeant de milieu. Ainsi, les trajectoires montrées sur cette figure seraient alors toutes des trajectoires possibles.



Pour trouver la trajectoire la plus rapide, on va supposer que la lumière change de milieu à une distance horizontale  $x$  du point A.



Le temps qu'il faut pour parcourir la trajectoire entre le point A et l'interface est

$$t_1 = \frac{\sqrt{a^2 + x^2}}{v_1}$$

Le temps qu'il faut pour parcourir la distance entre l'interface et le point B est

$$t_2 = \frac{\sqrt{b^2 + (L-x)^2}}{v_2}$$

Le temps total pour aller de A à B est donc

$$t = \frac{\sqrt{a^2 + x^2}}{v_1} + \frac{\sqrt{b^2 + (L-x)^2}}{v_2}$$

La valeur de  $x$  qui fait en sorte que le temps pour aller de A à B est minimal se trouve avec la dérivée. À un minimum, la dérivée de  $t$  doit être égale à zéro.

$$\frac{dt}{dx} = 0$$

On a donc

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{2x}{v_1 \sqrt{a^2 + x^2}} + \frac{1}{2} \frac{2(L-x)(-1)}{v_2 \sqrt{b^2 + (L-x)^2}} &= 0 \\ \frac{x}{v_1 \sqrt{a^2 + x^2}} + \frac{-(L-x)}{v_2 \sqrt{b^2 + (L-x)^2}} &= 0 \\ \frac{x}{v_1 \sqrt{a^2 + x^2}} &= \frac{(L-x)}{v_2 \sqrt{b^2 + (L-x)^2}} \end{aligned}$$

Or, on remarque (sur la dernière figure) que

$$\sin \theta_1 = \frac{x}{\sqrt{a^2 + x^2}} \quad \sin \theta_2 = \frac{(L-x)}{\sqrt{b^2 + (L-x)^2}}$$

Notre équation de la dérivée devient donc

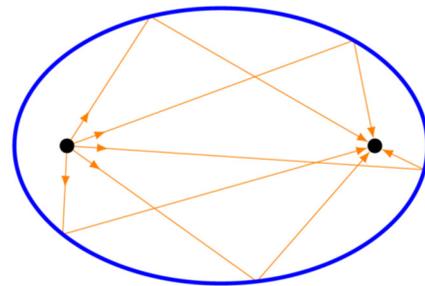
$$\frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{\sin \theta_2}{v_2}$$

qui est la formule de la loi de la réfraction. Cela veut donc dire que parmi toutes les trajectoires possibles que la lumière pouvait prendre entre A et B, elle est passée par le chemin qui prend le moins de temps.

## Et si le temps est le même pour plusieurs chemins

Il se pourrait que le temps soit le même pour plusieurs chemins. Par exemple, on pourrait se demander quel chemin va prendre une onde pour passer d'un foyer à un autre d'une ellipse.

Le principe dit que l'onde va suivre le chemin qui prend le moins de temps. Or, la distance à parcourir pour partir d'un foyer à l'autre après une réflexion est la même pour tous les chemins (c'est la définition même de l'ellipse). Puisque le temps est le même pour tous les chemins, tous les chemins sont bons. Cela signifie qu'une onde émise au foyer d'une ellipse va passer par tous ces chemins pour venir se concentrer à l'autre foyer. On peut voir l'onde passer d'un foyer à l'autre dans ce vidéo.

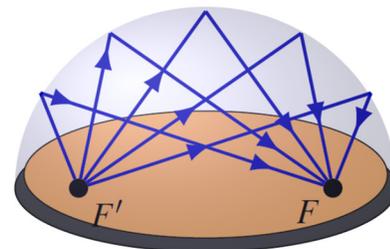


<https://www.youtube.com/watch?v=3leJFxxzPIc>

Certains architectes ont même repris cette idée pour faire des pièces elliptiques où, en se plaçant à l'un des foyers, on entend facilement une personne qui chuchote située à l'autre foyer.



Il y a une telle pièce au Statuary Hall, au Capitole à Washington. (Malgré qu'il semble y avoir seulement la moitié d'une ellipse, ça fonctionne quand même.)



[www.winstonchurchill.org/news-and-events/churchill-centre-news/2527-churchill-centre-to-donate-bust-of-winston-churchill-to-us-capitol](http://www.winstonchurchill.org/news-and-events/churchill-centre-news/2527-churchill-centre-to-donate-bust-of-winston-churchill-to-us-capitol)

De la même façon, le métro de Paris fut construit sur le même principe : les passagers sur un quai peuvent parfaitement entendre leurs congénères sur le quai en face. Ils sont tous deux situés aux foyers de l'ellipse, forme de la voûte du tunnel.

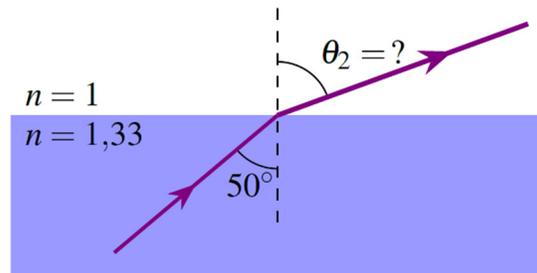
de.wikipedia.org/wiki/Notre-Dame-des-Champs\_(Métro\_Paris)



## 4.7 LA RÉFLEXION TOTALE

### L'angle critique

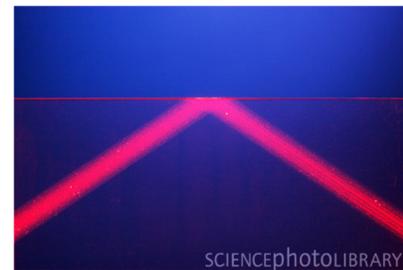
Il est possible dans certains cas que la réfraction soit impossible. Illustrons le tout par un exemple. Il faut déterminer l'angle inconnu du rayon lumineux dans la situation montrée sur la figure.



Si on applique la loi de la réfraction, on obtient

$$\begin{aligned} n_1 \sin \theta_1 &= n_2 \sin \theta_2 \\ 1,33 \cdot \sin 50^\circ &= 1 \cdot \sin \theta_2 \\ \sin \theta_2 &= 1,019 \end{aligned}$$

Il y a alors un petit problème : il n'y a pas de solution pour cette équation ! Cela signifie simplement qu'il n'y a pas de réfraction dans ce cas. La lumière va donc se réfléchir entièrement et aucune lumière ne va sortir de l'eau. C'est ce qu'on appelle la réflexion totale (appelée aussi réflexion interne totale) et qui fut découverte par Kepler en 1604. L'image de droite vous montre un faisceau de lumière rouge faisant une réflexion totale à une surface.



www.sciencephoto.com/media/97795/view

Pour qu'il y ait réflexion totale, on doit donc avoir

$$\sin \theta_2 > 1$$

Ce qui veut dire, en utilisant la loi de la réfraction, que

$$\begin{aligned} \sin \theta_2 &> 1 \\ \frac{v_2 \sin \theta_1}{v_1} &> 1 \end{aligned}$$

$$\sin \theta_1 > \frac{v_1}{v_2}$$

On peut réécrire cette condition sous la forme suivante.

### Angle critique pour la réflexion totale

$$\sin \theta_c = \frac{v_1}{v_2}$$

Si  $\theta_1$  est plus grand que  $\theta_c$ , alors il y a réflexion totale.

Avec la lumière, on peut écrire la condition autrement. Puisque

$$\sin \theta_c = \frac{c/n_1}{c/n_2}$$

on a

### Angle critique pour la réflexion totale pour la lumière

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

Si  $\theta_1$  est plus grand que  $\theta_c$ , alors il y a réflexion totale.

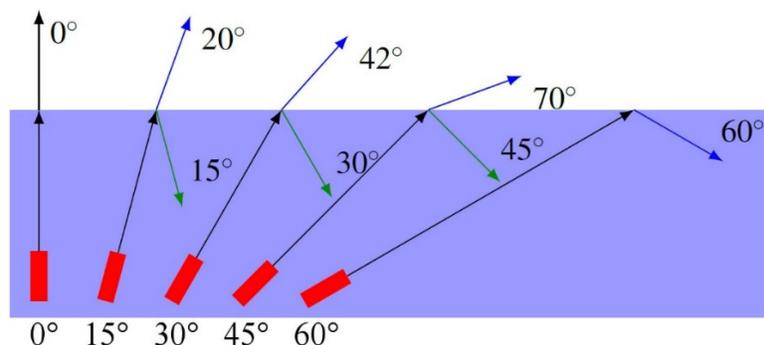
Pour de la lumière dans l'eau qui tente de passer à l'air, l'angle critique est

$$\sin \theta_c = \frac{1}{1,33}$$

$$\theta_c = 48,75^\circ$$

On voit qu'avec l'angle de  $50^\circ$ , qu'on avait précédemment dans l'exemple, on avait bel et bien une réflexion totale.

On voit sur la figure suivante ce qui se passe avec de la lumière dans l'eau qui tente de passer dans l'air selon l'angle d'incidence.



Pour des angles inférieurs à l'angle critique, il y a de la réflexion et de la réfraction. Quand l'angle d'incidence dépasse l'angle critique (dernier rayon ici), il n'y a plus de réfraction, il n'y a que de la réflexion.

On peut très bien voir ce phénomène dans ce vidéo inutilement long.

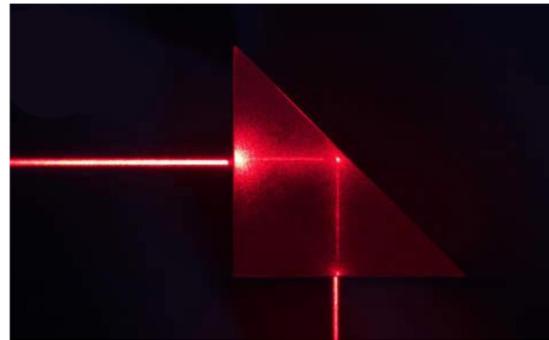
<http://www.youtube.com/watch?v=2kBOqfS0nmE>

Pour de la lumière dans l'air qui tente d'entrer dans l'eau, l'angle critique est

$$\sin \theta_c = \frac{1,33}{1}$$

Comme il n'y a pas de solution, il est impossible que la lumière dans l'air fasse une réflexion totale à la surface de l'eau. Pour qu'il y ait réflexion totale avec de la lumière, on doit absolument avoir  $n_1 > n_2$ .

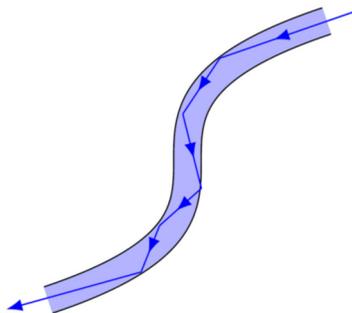
On utilise des prismes pour réfléchir la lumière dans certains appareils optiques, comme les jumelles. L'angle critique du verre dans l'air étant autour de  $42^\circ$ , les rayons qui arrivent à  $45^\circ$  sur la surface font une réflexion totale. On le voit bien sur cette figure.



www.visualphotos.com/image/1x7467350/total\_internal\_reflection\_at\_the\_hypotenuse\_of\_a

Pourquoi prendre un prisme alors qu'un miroir aurait très bien fait l'affaire? Un miroir n'est jamais efficace à 100 %, il y a toujours une partie de la lumière qui n'est pas réfléchi et passe à travers le miroir. On perd donc une partie de la lumière. Avec la réflexion totale, toute la lumière est réfléchi et on ne perd rien.

La réflexion totale est aussi à la base du fonctionnement des fibres optiques. On envoie le laser dans la fibre qui fait alors de la réflexion totale sur les côtés de la fibre. La lumière reste donc prisonnière à l'intérieur de la fibre jusqu'à ce qu'elle arrive au bout de celle-ci. On peut donc transmettre des signaux lumineux sur de grandes distances sans aucune perte d'énergie.



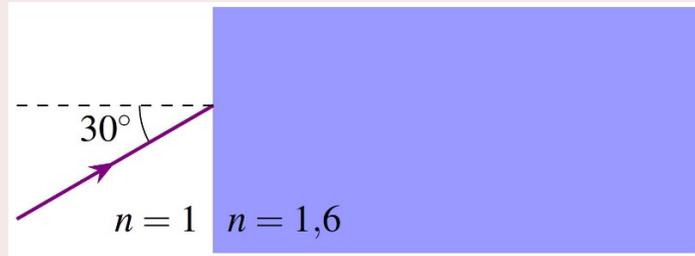
www.thimphutech.com/2009/04/optical-fiber-link-fixed.html

On peut aussi observer cet effet dans ce vidéo.

<http://www.youtube.com/watch?v=rlo2XeB2qt4>

**Exemple 4.7.1**

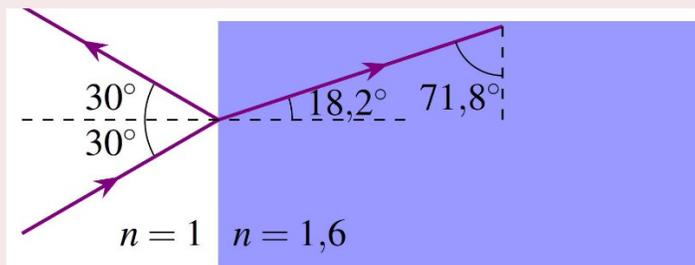
Quel sera le trajet de ce rayon lumineux après son entrée dans le morceau de verre ?



En arrivant à la surface du verre, on aura de la réflexion (à  $30^\circ$  selon la loi de la réflexion) et (possiblement) de la réfraction avec un angle de

$$\begin{aligned} n_1 \sin \theta_1 &= n_2 \sin \theta_2 \\ 1 \cdot \sin 30^\circ &= 1,6 \cdot \sin \theta_2 \\ \theta_2 &= 18,2^\circ \end{aligned}$$

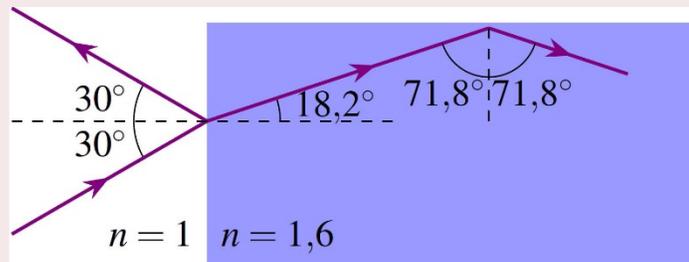
(Comme il y a une solution, il y a de la réfraction.) Ce rayon va continuer sa route et arriver de nouveau à l'interface avec un angle d'incidence de  $71,8^\circ$ .



Encore une fois, il y aura de la réflexion (à  $71,8^\circ$ ) et (possiblement) de la réfraction. L'angle de réfraction est

$$\begin{aligned} n_1 \sin \theta_1 &= n_2 \sin \theta_2 \\ 1,6 \cdot \sin 71,8^\circ &= 1 \cdot \sin \theta_2 \\ \sin \theta_2 &= 1,52 \end{aligned}$$

Comme il n'y a pas de solution, il n'y a pas de réfraction et il y a réflexion totale. La réponse finale est donc la solution montrée sur la figure de droite.



## 4.8 LA DISPERSION

On a dit au chapitre 2 que toutes les ondes, peu importe leur fréquence ou leur longueur d'onde, voyagent à la même vitesse si le milieu est non dispersif.

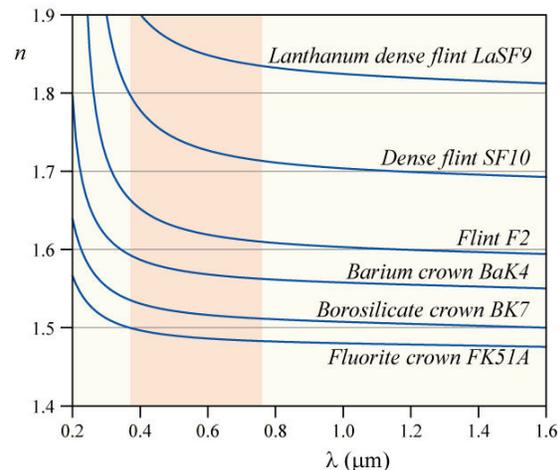
Pour plusieurs types d'onde, c'est souvent vrai. Par exemple, l'air est un milieu non dispersif pour les ondes sonores. Ainsi, les sons graves et aigus vont à la même vitesse dans l'air. Si ce n'était pas le cas, le son pourrait être considérablement modifié si les sons aigus allaient plus vite que les sons graves par exemple. On entendrait alors les sons aigus avant les sons graves. Ça modifierait bien l'allure d'un spectacle de musique si le son de la basse arrivait 1 seconde après le son de la guitare.

Pour la lumière, le vide est un milieu non dispersif. Par contre, plusieurs substances sont des milieux dispersifs pour la lumière. Voyons ce qui arrive dans ce cas.

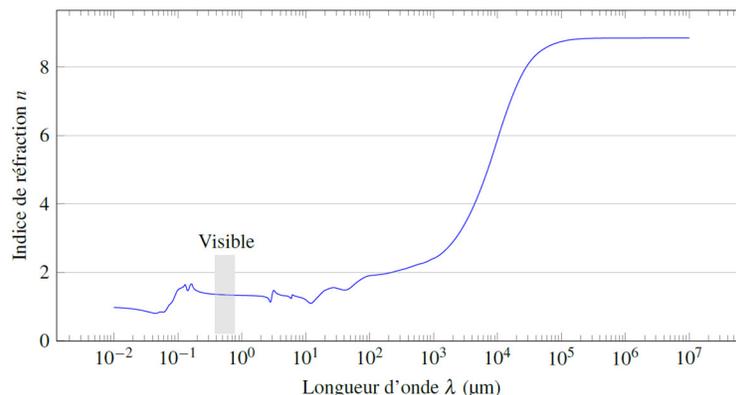
### Les variations d'indice de réfraction

Il arrive souvent qu'il y ait une légère variation de vitesse en fonction de la longueur d'onde pour la lumière dans des milieux transparents. Cela signifie que l'indice de réfraction varie en fonction de la longueur d'onde de la lumière. Ce graphique (à droite) montre cette variation de l'indice de quelques milieux transparents.

Ce graphique pourrait laisser croire que l'indice de réfraction diminue toujours avec la longueur d'onde, mais ce n'est pas le cas. Le graphique suivant montre les variations de l'indice de réfraction de l'eau pour une plus grande plage de longueur d'onde. On peut voir que parfois il monte, parfois il diminue.

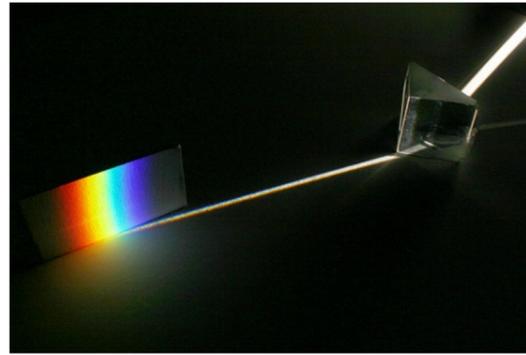


mathscinotes.wordpress.com/2010/10/06/dispersion-power-penalty-modeling-part-1/



## La séparation des couleurs

Le changement d'indice en fonction de la longueur d'onde fait en sorte que chaque couleur fera une réfraction un peu différente des autres couleurs. Ainsi, la lumière blanche, qui est une superposition de toutes les couleurs, sera séparée en ses différentes couleurs par la réfraction.



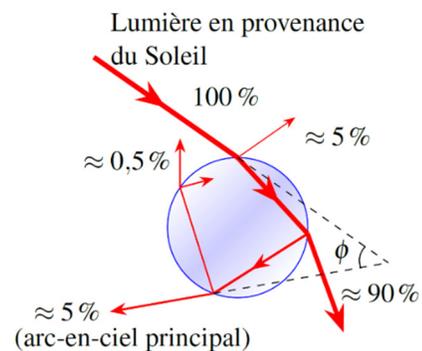
[www.e-education.psu.edu/astro801/content/13\\_p3.html](http://www.e-education.psu.edu/astro801/content/13_p3.html)

Pour le verre, l'indice de réfraction des petites longueurs d'onde du visible est très souvent plus grand que pour les grandes longueurs d'onde du visible. Cela veut dire que les petites longueurs d'onde (comme le mauve) seront un peu plus déviées que les grandes longueurs d'onde (comme le rouge) lors d'une réfraction. C'est ce qu'on peut voir sur la figure. Avec un milieu dispersif, on a donc fait la *dispersion de la lumière*.

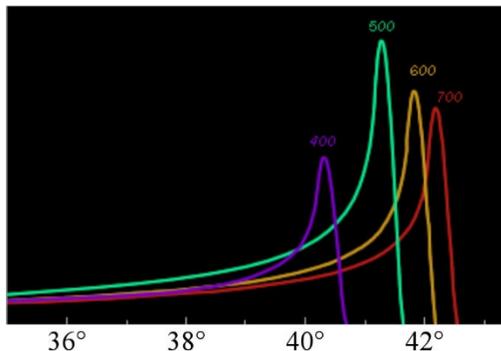
## L'arc-en-ciel

La dispersion est responsable d'un phénomène optique assez spectaculaire : l'arc-en-ciel. Elle se produit quand la lumière du Soleil passe à travers des gouttes de pluie et fait de la dispersion. Deux éléments sont donc essentiels à la formation d'un arc-en-ciel : la lumière du Soleil et des gouttes de pluie.

En fait, la lumière qui fait l'arc-en-ciel a un trajet un peu particulier : elle entre dans la goutte en faisant une réfraction puis fait une réflexion dans la goutte puis ressort en faisant une autre réfraction. Environ 5 % de la lumière va faire ce trajet.



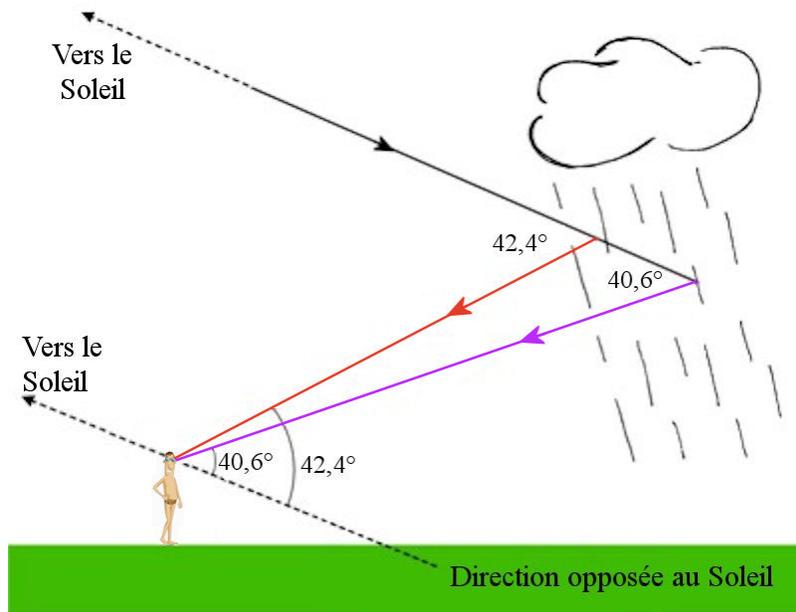
Les rayons du Soleil entrent avec différents angles dans la goutte et en ressortent avec des angles différents. Cependant, avec ce trajet, il y a quelque chose de particulier qui se passe : il y a une direction pour laquelle l'intensité de la lumière qui sort de la goutte est très grande. De plus, cette direction pour laquelle l'intensité est maximale varie selon la couleur



à cause de la dispersion. Pour le rouge, l'intensité est maximale quand il y a  $42,4^\circ$  (l'indice de réfraction est 1,3311) entre la direction initiale des rayons et le rayon émergent de la goutte. Pour la lumière bleue, l'angle est  $40,6^\circ$  (l'indice de réfraction est 1,3435). Le graphique de l'intensité en fonction de l'angle de déviation de la lumière (à gauche) montre les différences en fonction de la longueur d'onde.

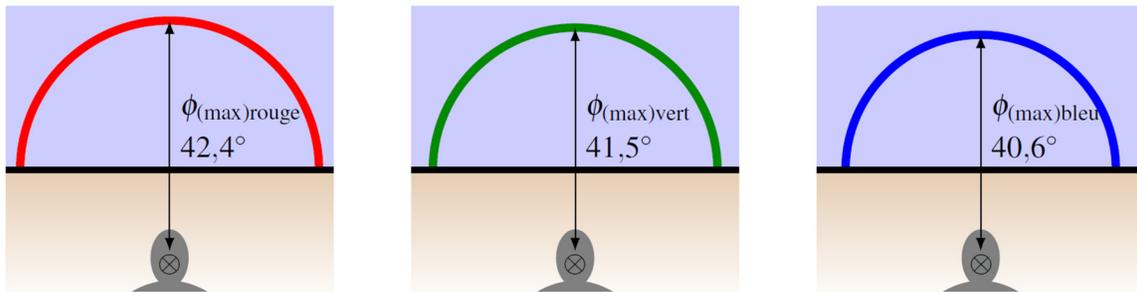
[www.atoptics.co.uk/rainbows/primcol.htm](http://www.atoptics.co.uk/rainbows/primcol.htm)

Comme l'angle des rayons intenses change avec la couleur, on a la situation suivante.

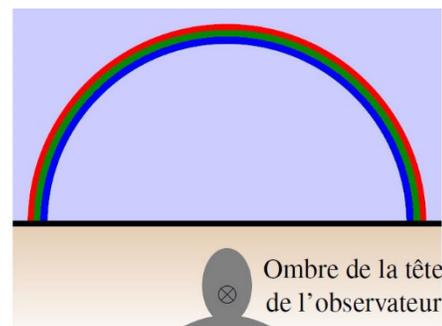


On peut donc voir de la lumière rouge à un angle de  $42,4^\circ$  avec la direction opposée au Soleil alors qu'on peut voir du mauve à un angle de  $40,6^\circ$  avec la direction opposée au Soleil.

Or, il y a plusieurs directions pour lesquelles l'angle est de  $42,4^\circ$ . Tous les points à  $42,4^\circ$  de la direction opposée au Soleil forment un cercle. On aura aussi un cercle pour toutes les autres couleurs, mais l'angle est différent. Notez que la direction opposée au Soleil correspond au centre de l'ombre de votre tête.



Dans ces figures, on n'a pas le cercle au complet, car il se termine au sol. (Il n'y a pas de gouttes de pluie sous le sol, donc il ne peut y avoir de lumière qui arrive de cette direction.) En combinant tous ces arcs de cercle de tailles différentes, on obtient un arc avec le mauve à l'intérieur et le rouge à l'extérieur.



Remarquez que plus le Soleil est bas sur l'horizon, plus l'arc sera haut dans le ciel. Il en est ainsi, car il doit y avoir toujours  $42^\circ$  entre l'arc et le centre de l'ombre de votre tête. Si le Soleil est bas, l'ombre est plus haute et l'arc est plus haut. Si le Soleil est trop haut au-dessus de

l'horizon (plus de  $42^\circ$ ), il n'y aura pas d'arc-en-ciel, car le point le plus haut de l'arc sera moins haut que le sol. La photo suivante montre le meilleur arc-en-ciel qu'il est possible de voir.



[www.rainbowsymphony.com/blogs/blog/the-science-behind-fully-double-rainbows](http://www.rainbowsymphony.com/blogs/blog/the-science-behind-fully-double-rainbows)

Premièrement, on a l'arc le plus grand possible (la moitié d'un cercle). Parfois, on n'a qu'une portion de l'arc quand il ne pleut pas partout le long de l'arc. Deuxièmement, l'arc est très haut dans le ciel. Cet arc s'est formé un peu avant le coucher du Soleil, ce qui signifie que le Soleil est très bas au-dessus de l'horizon. Si le Soleil est bas, l'arc est haut puisque le Soleil et l'arc sont toujours opposés un à l'autre.

En fait, on peut voir tout le cercle fait par l'arc-en-ciel si on est en avion. Dans ce cas, il peut y avoir de la pluie dans toutes les directions et on peut observer ceci.



[apod.nasa.gov/apod/ap140930.html](http://apod.nasa.gov/apod/ap140930.html)

Vous avez peut-être remarqué sur les deux images précédentes qu'il peut également se produire un deuxième arc. Il provient de la lumière qui a fait deux réflexions à l'intérieur de la goutte (rayon dont l'intensité est de 0,5 % sur la première figure de cette section). L'angle entre le point opposé au Soleil et cet arc secondaire est d'environ  $72^\circ$ . Cet angle

varie légèrement selon la couleur, mais cette fois-ci, c'est le rouge qui est plus fortement dévié. Sur l'arc secondaire, le rouge est donc à l'intérieur de l'arc et le mauve à l'extérieur.



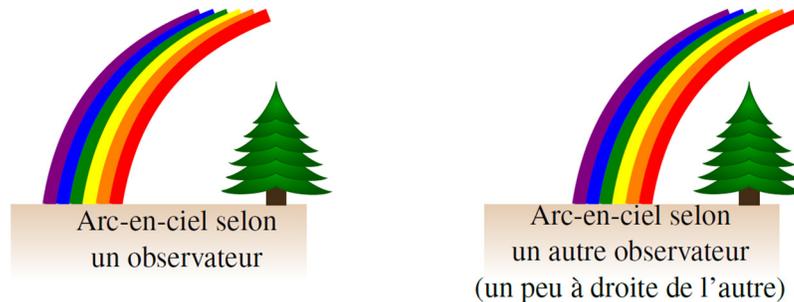
[wiki.pingry.org/u/physics/index.php/Rainbows,\\_Reflection,\\_and\\_Refraction](http://wiki.pingry.org/u/physics/index.php/Rainbows,_Reflection,_and_Refraction)

On dit parfois qu'il y a de l'or au pied des arcs-en-ciel. À part être ridicule, cette idée n'est pas possible pour deux raisons.

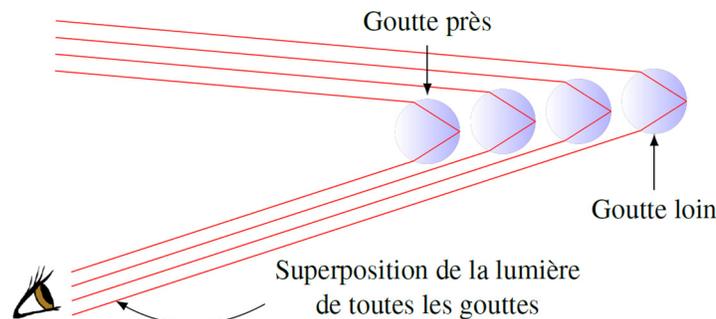
- 1) L'arc-en-ciel n'est pas à la même place pour tous les observateurs. Comme il est centré sur l'ombre de votre tête, le centre de l'arc est différent pour chaque personne.



[kenokazaki.com/tag/rainbow/](http://kenokazaki.com/tag/rainbow/)



- 2) L'arc n'est pas à une distance précise. Chaque goutte de pluie envoie de la lumière pour former l'arc-en-ciel et il peut y avoir des gouttes qui sont proches et des gouttes qui sont plus loin. S'il y a de la pluie de 1 km à 2 km de vous, la lumière que vous voyez provient de toutes les gouttes entre ces distances.



S'il ne pleut pas, vous pouvez vous faire un arc-en-ciel avec un arrosoir.

<http://www.youtube.com/watch?v=c6HsiixFS8>

Et ce n'est pas parce que votre eau est contaminée que ça fait ça, comme l'affirme la personne qui filme...

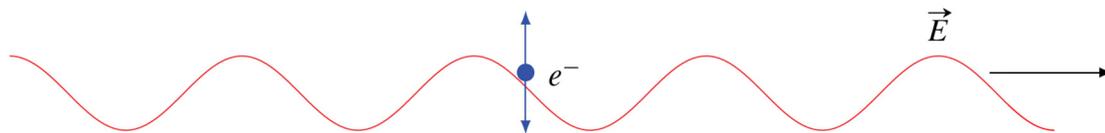
Voici un gars qui tripe un peu trop sur les arcs-en-ciel.

<http://www.youtube.com/watch?v=OQSNhk5ICTI>

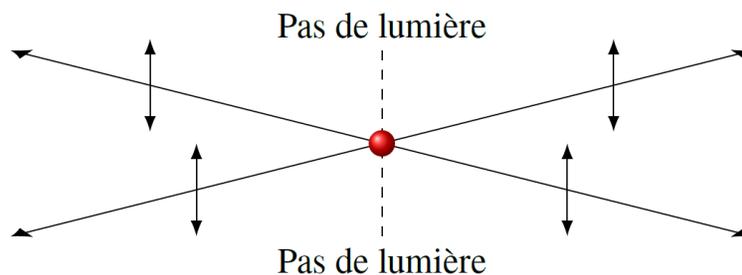
## 4.9 POLARISATION PAR RÉFLEXION

La lumière se réfléchissant sur une surface peut devenir polarisée. Pour comprendre pourquoi, on doit examiner comment la lumière est réfléchi par une surface.

Quand la lumière interagit avec des particules chargées, il se passe deux choses. Premièrement, le champ électrique oscillant de l'onde exerce une force oscillante sur les particules chargées. Cette force oscillante fait osciller les particules chargées dans la direction du champ électrique, donc dans la direction de la polarisation de l'onde avec la même fréquence que la fréquence de l'onde.

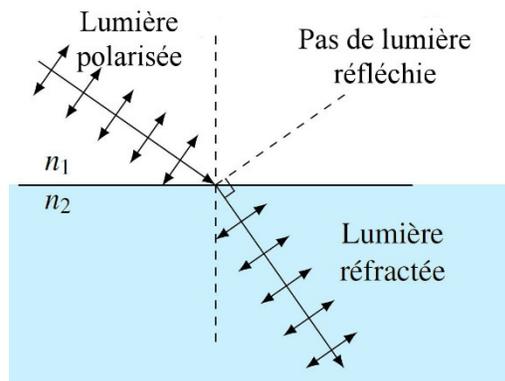
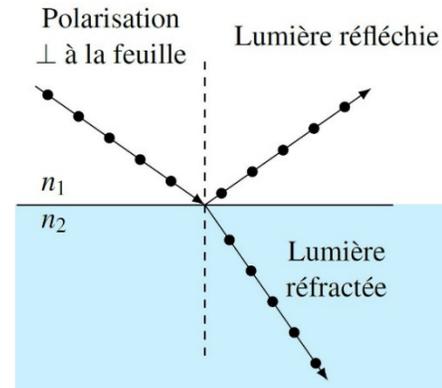


Ensuite, une particule chargée qui oscille émet des ondes électromagnétiques avec la même fréquence que la fréquence d'oscillation de la particule. L'onde émise est polarisée dans le sens de l'oscillation de la particule. Toutefois, l'onde n'est pas émise dans toutes les directions. Il y a des ondes émises dans le plan perpendiculaire à l'oscillation de la particule, mais il n'y en a pas dans la direction de l'oscillation de la particule.



Examinons maintenant ce qui se passe lors de la réflexion. Prenons un exemple précis pour simplifier le raisonnement : la lumière dans l'air se réfléchit et se réfracte en entrant dans l'eau. Quand l'onde électromagnétique arrive sur l'eau, elle fait osciller les particules chargées dans l'eau. À leur tour, ces particules qui oscillent émettent une onde électromagnétique. La lumière réfléchi vient entièrement de ces ondes émises par les particules chargées alors que la lumière réfractée est la combinaison de l'onde originale et de l'onde émise par les particules.

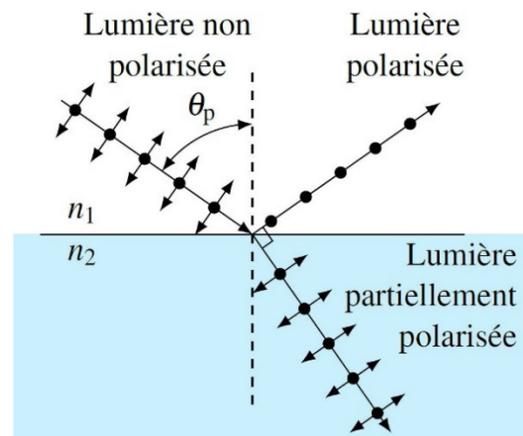
Si la lumière qui arrive sur la surface est polarisée parallèlement à la surface (donc perpendiculaire à la feuille), les particules du milieu vont également osciller dans cette direction. Comme la direction de l'onde réfléchie est perpendiculaire à la direction d'oscillation des particules, il y aura de la lumière réfléchie ayant cette polarisation.



Si la polarisation de la lumière n'est pas parallèle à la surface (donc dans le plan de la feuille), alors la situation est bien différente. La lumière fait osciller les particules dans la direction montrée sur la figure quand la lumière est dans l'eau. Cette oscillation provoque l'émission de lumière, mais il est impossible que ces oscillations fassent de la lumière dans la direction de la réflexion si la lumière réfléchie est dans la même direction que l'oscillation des particules. Dans ce cas, il n'y aurait pas lumière

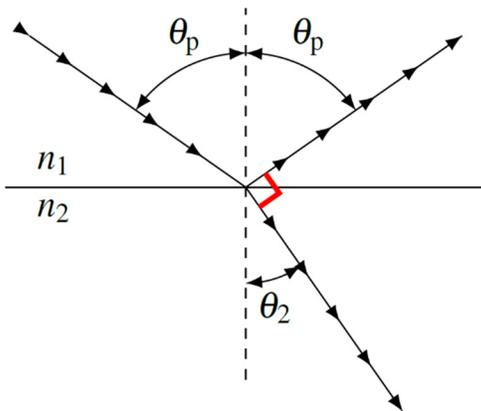
réfléchie parce que les particules qui oscillent ne peuvent pas faire de la lumière dans cette direction. Comme cette oscillation est perpendiculaire à la direction du rayon réfracté, il n'y a pas de lumière réfléchie pour cette polarisation s'il y a  $90^\circ$  entre le rayon réfracté et le rayon réfléchi.

Ainsi, si on envoie de la lumière non polarisée sur une surface, les deux polarisations seront présentes. Pour savoir ce qui se passe, on a qu'à superposer les deux figures des réflexions obtenues pour chaque polarisation. On a alors la situation montrée sur la figure de droite.



Les deux polarisations sont alors présentes dans la lumière qui arrive sur la surface. Cependant, comme une seule de ces polarisations peut être réfléchie, la lumière réfléchie sera polarisée. Les deux polarisations peuvent faire la lumière réfractée et le rayon réfracté n'est donc pas polarisé. Il est cependant partiellement polarisé, car une des polarisations est plus forte que l'autre. La polarisation qui peut faire de la réflexion a perdu une partie de son intensité lors de la réflexion et il reste donc moins d'intensité dans le rayon réfracté comparé à la polarisation qui ne fait pas de réflexion. C'est donc ainsi qu'on peut obtenir, par réflexion, une lumière polarisée à partir d'une lumière non polarisée.

En résumé, il doit y avoir  $90^\circ$  entre les rayons réfléchis et réfractés pour obtenir de la lumière réfléchie totalement polarisée. On peut trouver cet angle en partant de cette figure. Selon la loi de Snell-Descartes, on a



$$n_1 \sin \theta_p = n_2 \sin \theta_2$$

Puisqu'il y a  $90^\circ$  entre les rayons réfractés et réfléchis, on a

$$\theta_p + 90^\circ + \theta_2 = 180^\circ$$

$$\theta_2 = 90^\circ - \theta_p$$

Ce qui nous donne

$$n_1 \sin \theta_p = n_2 \sin \theta_2$$

$$n_1 \sin \theta_p = n_2 \sin (90^\circ - \theta_p)$$

$$n_1 \sin \theta_p = n_2 \cos \theta_p$$

Puisque  $\sin \theta / \cos \theta = \tan \theta$ , on a

### Angle de polarisation ou angle de Brewster

$$\tan \theta_p = \frac{n_2}{n_1}$$

### Exemple 4.9.1

Quel est l'angle de polarisation de la lumière dans l'air se réfléchissant sur l'eau ?

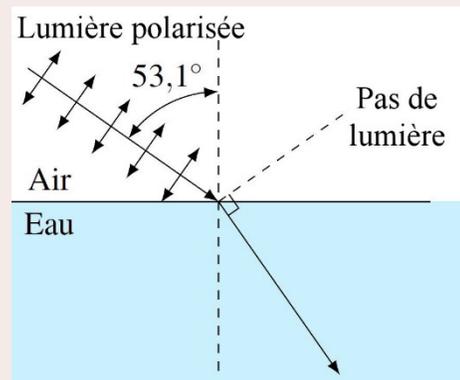
L'angle est

$$\tan \theta_p = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\tan \theta_p = \frac{1,33}{1}$$

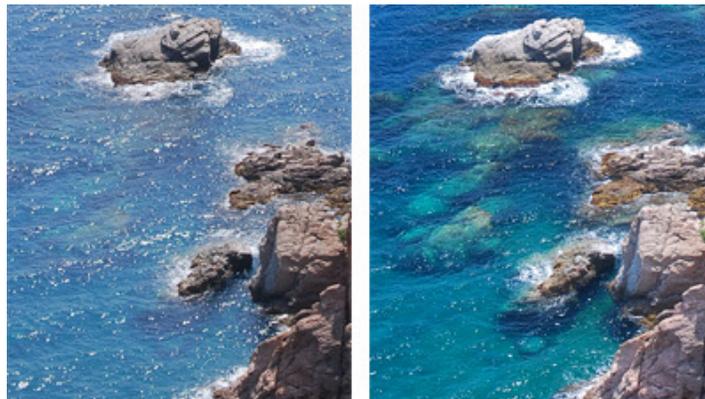
$$\theta_p = 53,1^\circ$$

Cela veut dire que la lumière polarisée dans la direction indiquée sur la figure ne fera aucune réflexion sur l'eau si l'angle d'incidence est de  $53,1^\circ$ .



Si l'angle d'incidence n'est pas de  $53,1^\circ$ , alors il y aura de la lumière réfléchi. Plus on s'éloigne de l'angle de polarisation, plus l'intensité de la lumière réfléchi sera importante.

On peut très bien voir cet effet avec les images suivantes. Dans cette première image, on peut voir à gauche la scène normalement. On ne voit pas très bien le fond de la mer parce que la lumière réfléchi par la surface est plus intense que la lumière qui provient du fond. À droite, on regarde la même scène, mais avec un filtre polarisant ayant un axe vertical. Comme la lumière réfléchi sur l'eau est polarisée horizontalement, le filtre bloque cette lumière. Maintenant, la lumière qui provient du fond est plus intense que la lumière réfléchi, et on voit bien le fond.



[www.digital-photography-tips.net/Stay\\_Focussed-Newsletter-March-2013.html](http://www.digital-photography-tips.net/Stay_Focussed-Newsletter-March-2013.html)

Sur l'image suivante, on voit la lumière réfléchi sur l'automobile sur l'image de gauche. Si on prend un filtre polarisant avec un axe horizontal, on bloque la lumière qui s'est réfléchi sur les surfaces verticales et qui est maintenant polarisée verticalement. On ne voit plus la lumière réfléchi (image de droite).



[fotografium.com/bw-55mm-polarize-filtre#.UxyRqv15PTo](http://fotografium.com/bw-55mm-polarize-filtre#.UxyRqv15PTo)

En fait, la lumière réfléchi est rarement totalement polarisée. Pour que cela arrive, il faut que l'angle d'incidence soit exactement égal à l'angle de polarisation. Mais même si l'angle n'est pas exactement égal à l'angle de polarisation, la polarisation de la lumière réfléchi parallèle à la surface est souvent plus forte que l'autre composante. On a donc une polarisation partielle. Le filtre va bloquer la polarisation la plus forte et la lumière réfléchi sera donc moins intense avec le filtre. On peut voir ce phénomène avec la figure suivante. On y voit la lumière réfléchi sur un lac à travers un filtre polarisant avec un axe vertical.



paraselene.de/cgi/bin?\_SID=7e65d76b84105709c35aee86f67c20bdca7aab00268925652735  
&\_bereich=artikel&\_aktion=detail&idartikel=116150&\_sprache=paraselene\_englisch

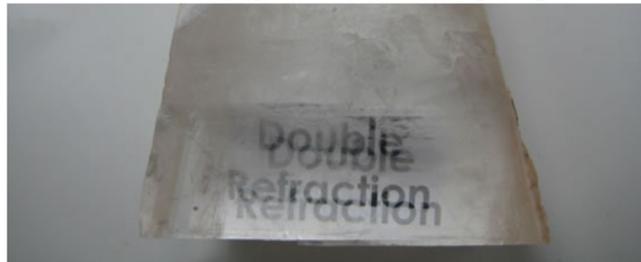
On voit au bas de la figure qu'il n'y a pratiquement pas de lumière réfléchi sur le lac. C'est que la lumière provenant de cet endroit arrive sur le lac avec un angle d'incidence tout près de l'angle de polarisation. La lumière fortement polarisée qui se reflète alors est presque toute bloquée par le filtre polarisant et on ne voit pas de lumière réfléchi. Ailleurs sur le lac, on peut voir la lumière réfléchi. La réflexion qu'on voit à ces endroits s'est faite avec un angle assez loin de l'angle de polarisation. Dans ce cas, la lumière réfléchi n'a qu'une polarisation très partielle. Même si le filtre bloque la polarisation horizontale, il reste l'autre polarisation et on peut donc voir de la lumière réfléchi.

Les lunettes polarisées sont simplement des filtres polarisants avec un axe de polarisation verticale. L'effet n'est pas spectaculaire avec de la lumière non polarisée : il ne passe que la moitié de la lumière. La lumière est polarisée après le passage dans les lunettes, mais notre œil n'est pas sensible à la polarisation, ce qui veut dire qu'on ne voit aucune différence entre de la lumière polarisée dans une direction ou dans une autre ou entre de la lumière polarisée et de la lumière non polarisée. Il y aura par contre une différence avec la lumière réfléchi. On vient de voir que la lumière réfléchi est polarisée avec une direction parallèle à la surface. La lumière qui se réfléchit sur un lac ou sur le sol est donc polarisée horizontalement (totalement ou partiellement). Avec des lunettes ayant un axe vertical, on bloque cette lumière réfléchi polarisée. La lumière réfléchi est donc fortement atténuée avec les lunettes polarisées. C'est ce qu'on peut voir dans ce vidéo.

<http://www.youtube.com/watch?v=MNbg4Go8NR0>

## 4.10 LA BIRÉFRINGENCE

En 1669, le savant Danois Rasmus Bartholin découvre un phénomène étrange : quand on place un cristal de calcite sur du texte, on voit le texte en double ! Notez que les deux images du texte ont exactement la même intensité.



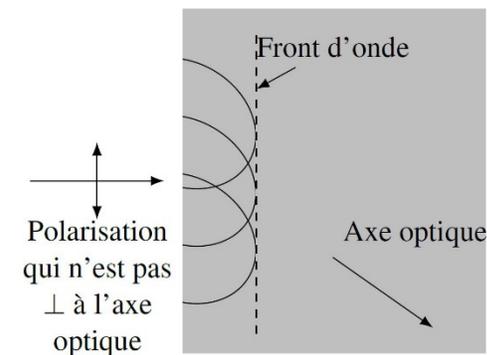
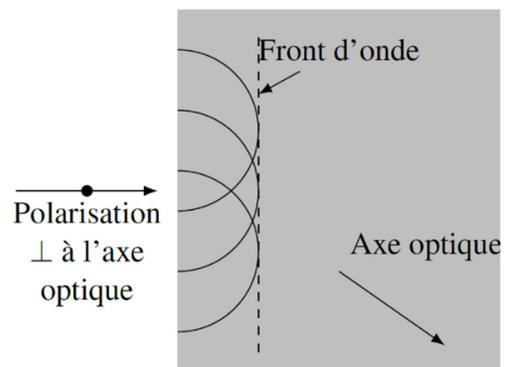
faculty.kutztown.edu/friehauf/beer/ (oui, oui, c'est le bon site)

On appelle ce phénomène la *double réfraction* ou *biréfringence*, car la séparation de l'image en deux vient du fait que la réfraction de chaque image est différente quand elles passent dans la calcite. C'est d'ailleurs ce phénomène qui fit dire à Newton que la lumière semble avoir deux aspects différents, un peu comme les deux pôles d'un aimant, ce qui amena le terme *polarisation*.

## Explication de la biréfringence

Certains cristaux ne sont pas isotropes (ce qui arrive si les molécules sont toutes alignées dans la même direction). Cela fait souvent en sorte que la lumière peut aller plus vite dans une direction dans le cristal pour une polarisation. Cette direction est indiquée par l'axe optique du cristal.

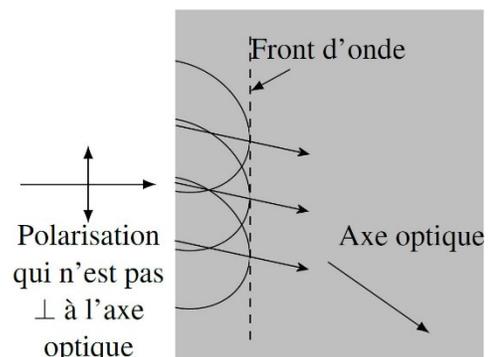
Voyons ce que cela signifie pour de la lumière polarisée dans une direction perpendiculaire à l'axe optique du cristal. Cette polarisation crée des ondes qui se propagent à la même vitesse dans toutes les directions (cercles sur la figure) et elle se propage donc normalement dans la substance (perpendiculairement au front d'onde). Cette polarisation forme le *rayon ordinaire*.

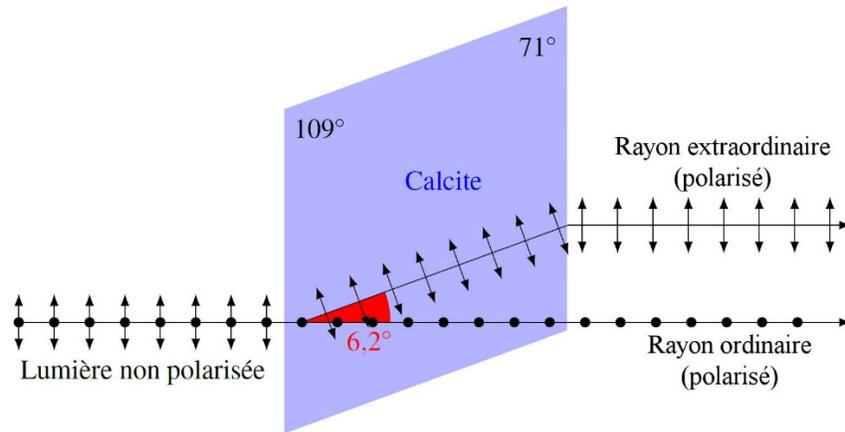


Pour l'autre polarisation, l'onde se propage plus rapidement dans la direction de l'axe optique. Les ondes ne sont plus des cercles, mais des ellipses étirées dans la direction de l'axe optique.

Jusqu'ici, on avait dit que les rayons sont toujours perpendiculaires aux fronts d'onde. C'est vrai si la vitesse de la lumière est la même dans toutes les directions, mais ce n'est plus vrai si la vitesse est différente, comme ici. La direction est plutôt celle montrée sur la figure de droite.

Ce rayon va du centre des ellipses au point de l'ellipse tangent au front d'onde. Cela fait que ce rayon ne se propage pas dans la direction prévue (qui aurait été directement vers la droite ici puisque l'angle d'incidence était nul). Le rayon allant dans cette direction est appelé le *rayon extraordinaire*. Pour la calcite, l'angle entre le rayon ordinaire et le rayon extraordinaire est de  $6,2^\circ$ .





Ainsi, si on fait passer de la lumière non polarisée, alors il y aura le rayon ordinaire et le rayon extraordinaire en même temps. La lumière non polarisée est donc séparée en deux rayons polarisés ayant la même intensité.

Avec un filtre polarisant, il est assez facile de voir que les deux images obtenues avec un cristal de calcite sont polarisées. En tournant le filtre, on peut d'ailleurs passer d'une image à l'autre.

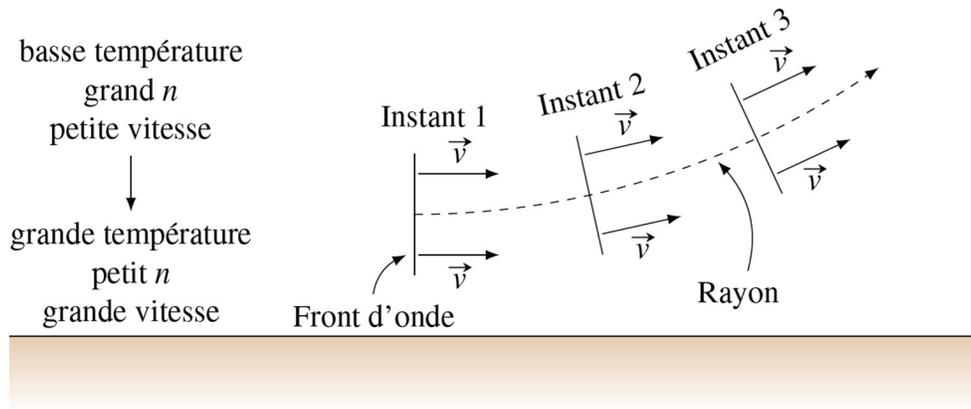
<http://www.youtube.com/watch?v=WdrYRJfiUv0>

L'étude du passage de la lumière dans des cristaux anisotropique est d'ailleurs assez complexe. L'indice de réfraction devient alors une matrice 3 x 3 et il se peut qu'il y ait de la réfraction avec un certain angle, même si l'angle d'incidence est nul, comme c'est le cas pour le rayon extraordinaire dans la calcite. Nous n'étudierons pas ces cas complexes.

## 4.11 RÉFRACTION QUAND LA VITESSE DE L'ONDE CHANGE CONTINUUELLEMENT

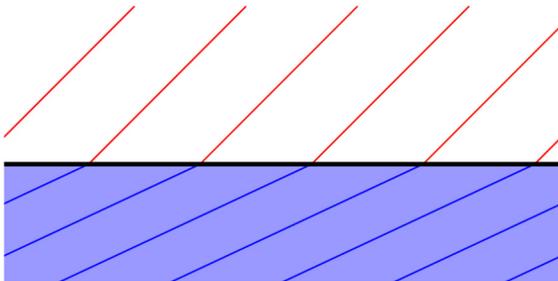
Voyons maintenant ce qui arrive si la vitesse de l'onde varie continuellement d'un endroit à l'autre. Par exemple, on va examiner la déviation de la lumière si l'indice de réfraction de l'air change graduellement avec la hauteur par rapport au sol. Cela se produit souvent puisque l'indice de réfraction de l'air dépend de la densité de celle-ci et donc de sa température. La lumière du Soleil passe, en bonne partie, à travers l'atmosphère et chauffe le sol, qui à son tour chauffe l'air. L'air près du sol est donc souvent plus chaud que l'air à une hauteur plus élevée, ce qui diminue sa densité et son indice de réfraction. La vitesse de l'onde est donc plus grande près du sol.

Prenons un front d'onde vertical (instant 1) pour illustrer ce qui arrivera alors. On se rappelle aussi que la direction de propagation de l'onde doit être perpendiculaire au front d'onde.



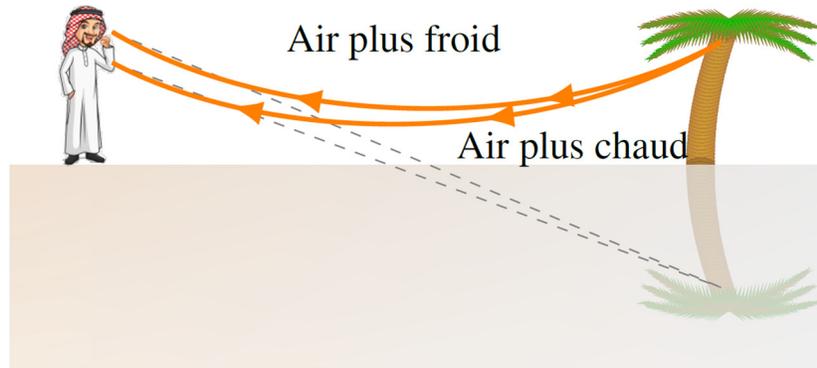
Comme la vitesse de l'onde n'est pas la même partout, le front d'onde n'ira pas partout à la même vitesse. Dans notre exemple, la vitesse du front d'onde est plus grande en bas du front d'onde qu'en haut. Cela fait que le bas du front d'onde va dépasser le haut du front d'onde. Le front d'onde ne sera donc plus vertical, mais incliné (instant 2). Cela implique aussi que la direction de propagation de l'onde a changé, car elle doit toujours être perpendiculaire au front d'onde. L'onde va maintenant un peu vers le haut. Plus le bas de l'onde va prendre les devants par rapport au haut de l'onde, plus la direction de propagation de l'onde sera déviée vers le haut.

On peut même calculer la forme de la trajectoire si on sait comment change l'indice de réfraction avec l'altitude. Si vous désirez, vous pouvez voir un exemple dans ce document. <http://physique.merici.ca/ondes/trajectoire-lumiere.pdf>



Cette déviation est aussi de la réfraction parce que c'est la même chose qui se passe quand la lumière passe d'un milieu à un autre. Quand le front d'onde dans l'air entre de l'eau, sa vitesse diminue. La partie du front d'onde dans l'air prend donc les devants par rapport à la partie dans l'eau, ce qui change l'orientation du front d'onde de même que la direction de propagation de l'onde.

Supposons maintenant qu'il y a de la lumière émise par un palmier et que cette lumière se dirige vers le sol. Puisque l'onde va vers le bas, le haut du front d'onde a les devants par rapport au bas du front d'onde au départ (on voit ces fronts d'onde sur la partie de droite de la figure ici-bas). Mais comme le bas du front d'onde va plus vite, il va lentement dépasser le haut du front d'onde pour ensuite prendre les devants. Cela implique que la direction de propagation de l'onde va lentement changer pour maintenant se diriger vers le haut. (La trajectoire est beaucoup plus courbée sur cette trajectoire que ce qu'on a en réalité.)



Quand l'observateur reçoit la lumière, il interprète la lumière comme il le fait depuis toujours. Il pense que les rayons lumineux se propagent en ligne droite. L'observateur va donc penser que le palmier est au point de croisement des lignes droites qui sont dans la direction des rayons qu'il voit (lignes pointillées). Il voit donc le palmier en regardant vers le sol ! En l'absence de palmier, il verrait le ciel dans cette direction. Comme le ciel est bleu, il verrait du bleu en regardant vers le sol et il va penser qu'il y a un lac. On peut voir cet effet sur les photos suivantes.



[www.sflorg.com/nature\\_trail/atmospheric/atmospheric\\_10](http://www.sflorg.com/nature_trail/atmospheric/atmospheric_10)

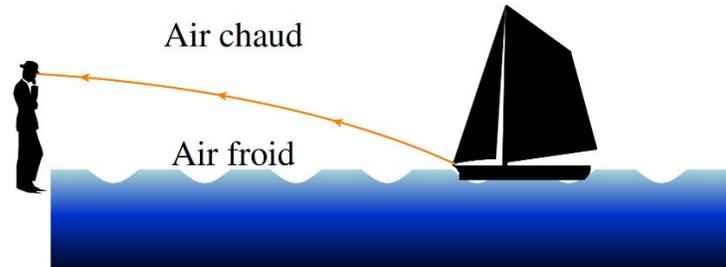


[www.crystalinks.com/mirage.html](http://www.crystalinks.com/mirage.html)

Le mirage qu'on voit dans ce vidéo (à 1 : 10) est pas mal impressionnant. On dirait vraiment qu'il y a un lac.

<http://www.youtube.com/watch?v=HzIBmuLHMSE>

Cet effet peut se produire de façon inverse au-dessus de l'eau si l'air est plus chaud que l'eau. L'eau refroidit alors l'air au-dessus du lac et l'indice de réfraction est plus grand près de l'eau. La lumière dévie donc dans la direction indiquée sur la figure.



On peut voir une démonstration d'une telle réfraction dans ce vidéo.

<http://www.youtube.com/watch?v=BV3aRiL64Ak>

On a mis du sirop de maïs au fond du bac et ensuite de l'eau. Au bout de quelques jours, le sirop s'est dissous, mais l'eau est plus dense près du fond, ce qui fait que l'indice de réfraction est plus grand au bas du bac.

Au-dessus d'une étendue d'eau froide, on pourra alors voir des choses telles que celles montrées sur cette image.



[scribol.com/featured/a-world-of-mirages-10-dazzling-optical-phenomena-from-round-the-globe/7497](http://scribol.com/featured/a-world-of-mirages-10-dazzling-optical-phenomena-from-round-the-globe/7497)

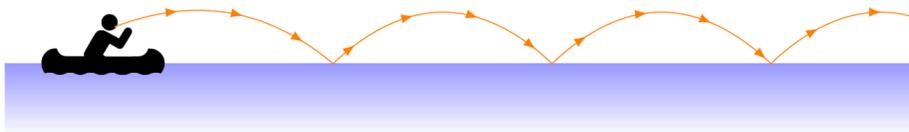


Enfin, on peut avoir des variations de température plus complexes qui pourront dévier la lumière de façon plus spectaculaire, comme on peut le voir sur cette image.

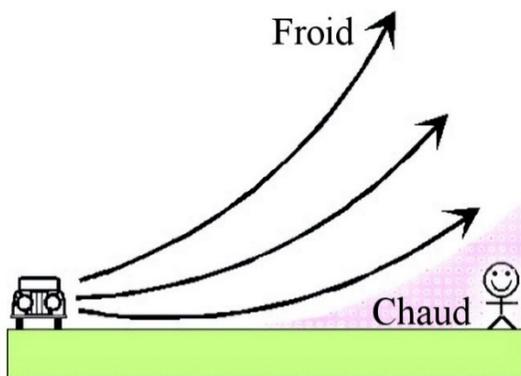
[www.flickr.com/photos/dcartiersr/2283060804/](http://www.flickr.com/photos/dcartiersr/2283060804/)

Ce phénomène n'est pas spécifique à la lumière puisque tous les types d'ondes font de la réfraction. Le son peut également faire des trajectoires semblables puisque la vitesse du son dépend de la température et une vitesse plus élevée a exactement le même effet qu'un indice de réfraction plus petit.

Supposons par exemple que vous êtes en train de parler dans une chaloupe à la surface d'un lac. Pendant l'été, l'air est généralement plus chaud que le lac ce qui va faire que l'air près de la surface du lac est plus froid que l'air plus haut. Le son près du lac va donc moins vite qu'à une altitude plus élevée, ce qui fait courber la trajectoire du son vers la surface du lac. Quand le son revient sur le lac, il se réfléchit pour ensuite repartir vers le haut. La réfraction dévie alors la trajectoire à nouveau vers la surface du lac où le son se réfléchit à nouveau. Ce processus se répète jusqu'à ce que le son atteigne le bord du lac.

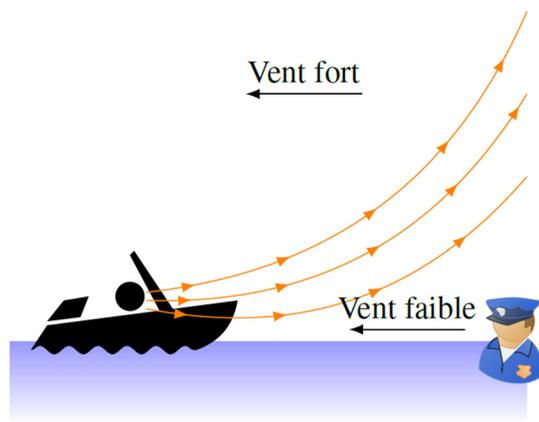


C'est pour ça que lors des journées chaudes d'été, on entend très bien tous les sons, comme les moteurs, qui proviennent de la surface du lac quand on est sur le rivage.



[www.pa.op.dlr.de/acoustics/essay1/brechung\\_en.html](http://www.pa.op.dlr.de/acoustics/essay1/brechung_en.html)

Si la température de l'air diminue avec l'altitude, la déviation du son se fera vers le haut. Sur cette image, la personne n'entend même pas le bruit de l'auto puisque tous les sons sont déviés et passent au-dessus de sa tête. C'est ce qui se produit à la surface d'un lac la nuit quand le lac est plus chaud que l'air. Vous pouvez aller faire le party sur le lac, et personne ne vous entend autour du lac...

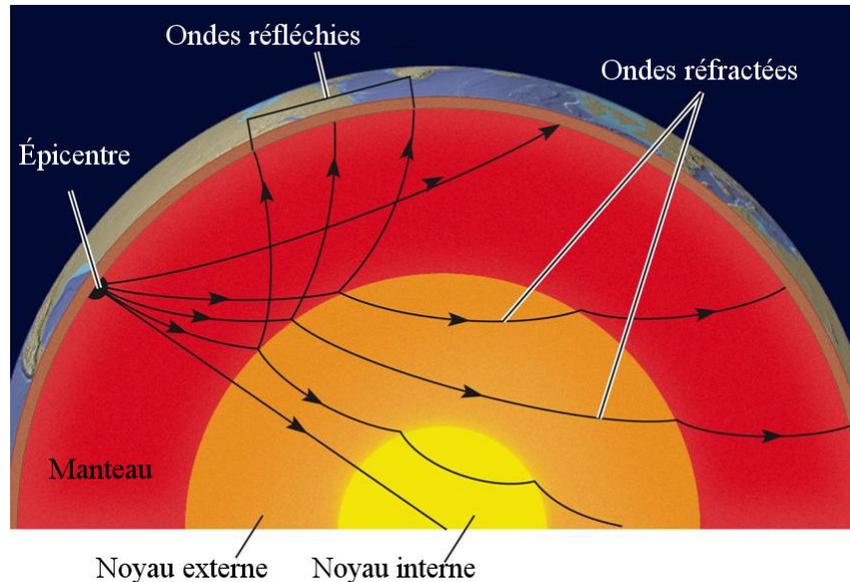


Sachez que le vent peut aussi provoquer des effets semblables avec le son. Dans la figure ci-contre, le vent est plus fort en altitude qu'au sol (ce qui est généralement le cas). Cela a pour effet de ralentir davantage le haut des fronts d'onde que le bas des fronts d'onde. Le front d'onde change alors lentement de direction comme illustrée sur la figure, ce qui a pour effet de changer la direction de propagation de l'onde. Le son est donc dévié vers le ciel dans cette situation et le petit bonhomme n'entend pas l'auto. Il

est donc très possible que, si vous criez quelque chose à quelqu'un qui est loin et que le son va contre le vent, cette personne ne vous entende pas du tout. Ce n'est pas parce que le

vent a arrêté votre cri (ce qui est impossible puisque la vitesse du son est beaucoup plus grande que la vitesse du vent), mais plutôt parce que la différence de vitesse du vent selon l'altitude a fait dévier le son vers le haut.

Les ondes générées par des tremblements de terre subissent aussi de la réfraction à l'intérieur de la Terre. Vous pouvez voir que les ondes subissent une réfraction soudaine en passant du manteau au noyau externe et en passant du noyau externe au noyau interne. Il y a aussi une lente réfraction à l'intérieur même de chacune de ces structures parce que la vitesse de l'onde change avec la pression et la température des roches.



[slideplayer.com/slide/7080633/](https://slideplayer.com/slide/7080633/)

En mesurant les ondes qui arrivent à la surface de la Terre, on peut déduire la façon dont elles ont été réfractées et de là, déduire la structure interne de la Terre.

## RÉSUMÉ DES ÉQUATIONS

### Fréquence et longueur d'onde lors d'un changement de milieu

$$f_1 = f_2$$

$$\frac{v_1}{\lambda_1} = \frac{v_2}{\lambda_2}$$

### Amplitudes des ondes réfléchi et transmise

$$A_R = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} A$$

$$A_T = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} A$$

**Règles pour la réflexion et la transmission.**

Plus l'impédance des milieux est différente, plus la réflexion sera grande et plus la transmission sera petite.

Si les impédances des milieux sont identiques, l'onde est complètement transmise et il n'y a pas de réflexion.

**Inversion des ondes réfléchies et transmises**

Si  $Z_2 > Z_1$ , l'onde réfléchie sera inversée.

Si  $Z_2 < Z_1$ , l'onde réfléchie ne sera pas inversée.

L'onde transmise n'est jamais inversée

**Changement de longueur d'onde dans une substance transparente**

$$\lambda_{\text{substance}} = \frac{\lambda_{\text{vide}}}{n}$$

**Amplitudes des ondes réfléchies et transmises pour la lumière**

$$E_{0R} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} E_0$$

$$E_{0T} = \frac{2n_1}{n_1 + n_2} E_0$$

**Règles pour la réflexion et la transmission de la lumière**

L'onde arrive dans le milieu 1 (indice  $n_1$ ) et tente de passer dans le milieu 2 (indice  $n_2$ )

Si  $n_2 > n_1$ , l'onde réfléchie sera inversée.

Si  $n_2 < n_1$ , l'onde réfléchie ne sera pas inversée.

L'onde transmise n'est jamais inversée.

**Loi de la réflexion**

$$\theta_1 = \theta_2$$

**Loi de la réfraction**

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

**Loi de la réfraction pour la lumière**

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

### Principe de Fermat

En passant d'un point à un autre, la lumière prend toujours le chemin qui prend le moins de temps.

### Angle critique pour la réflexion totale

$$\sin \theta_c = \frac{v_1}{v_2}$$

Si  $\theta_1$  est plus grand que  $\theta_c$ , alors il y a réflexion totale.

### Angle critique pour la réflexion totale pour la lumière

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

Si  $\theta_1$  est plus grand que  $\theta_c$ , alors il y a réflexion totale.

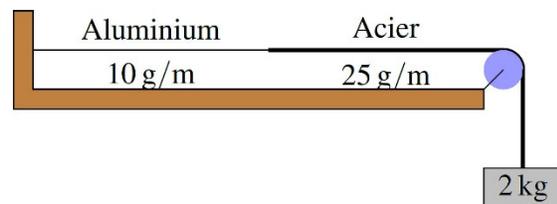
### Angle de polarisation ou angle de Brewster

$$\tan \theta_p = \frac{n_2}{n_1}$$

## EXERCICES

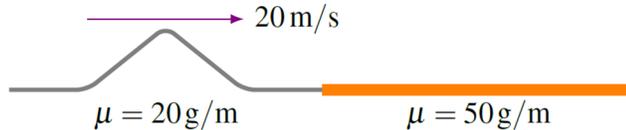
### 4.2 Ondes sur une corde

1. Dans la situation montrée sur la figure, une onde sinusoïdale ayant une longueur d'onde de 20 cm et une amplitude de 5 mm part du côté gauche du fil d'aluminium pour se diriger vers le fil d'acier.



- Quelle est la vitesse de l'onde dans le fil d'aluminium ?
- Quelle est la fréquence de l'onde quand elle est dans le fil d'aluminium ?
- Quelle est la vitesse de l'onde dans le fil d'acier ?
- Quelle est la fréquence de l'onde quand elle est dans le fil d'acier ?
- Quelle est la longueur d'onde de l'onde quand elle est dans le fil d'acier ?
- Quelle est l'impédance du fil d'aluminium ?
- Quelle est l'impédance du fil d'acier ?
- Quelle est l'amplitude de l'onde réfléchiée ? (Spécifiez si l'onde réfléchiée est inversée.)
- Quelle est l'amplitude de l'onde transmise ?
- Quel pourcentage de la puissance de l'onde initiale est transmis dans le câble d'acier ?

2. Une onde sur une corde arrive à un endroit où la masse linéique de la corde change.



- Dans quelle direction (vers le haut ou vers le bas) sera l'onde transmise ?
  - Dans quelle direction (vers le haut ou vers le bas) sera l'onde réfléchi ?
  - Quelle sera la vitesse de l'onde transmise ?
  - Quelle sera la vitesse de l'onde réfléchi ?
3. Une onde se propage sur une corde ayant une certaine impédance. L'onde arrive alors à une jonction entre deux cordes. En passant d'une corde à l'autre, la moitié de la puissance de l'onde est transmise et l'autre moitié est réfléchi. Sachant que l'impédance de la deuxième corde ( $Z_2$ ) est plus grande que l'impédance de la première corde ( $Z_1$ ), déterminez le rapport des impédances des deux cordes ( $Z_2/Z_1$ ) ?

### 4.3 Ondes arrivant perpendiculairement sur une surface

- 4.
- Quelle est l'impédance de l'air si sa densité est de  $1,3 \text{ kg/m}^3$  et que sa température est de  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  ?
  - Quelle est l'impédance de l'eau si la densité est de  $1000 \text{ kg/m}^3$  et que la vitesse des ondes sonores dans l'eau est de  $1520 \text{ m/s}$  ?
  - Peut-on conclure que le son peut passer facilement de l'air à l'eau ?
5. Un son de  $200 \text{ Hz}$  et ayant une intensité de  $60 \text{ dB}$  dans l'air entre dans l'eau.
- Quelle est l'intensité du son transmis dans l'eau et du son réfléchi dans l'air ?
  - Montrez que l'intensité du son transmis est toujours  $29,3 \text{ dB}$  plus basse que l'intensité initiale quand un son, peu importe son intensité initiale et sa fréquence, passe de l'air à l'eau.

Utilisez les données suivantes.

Air : vitesse de l'onde =  $330 \text{ m/s}$

densité =  $1,3 \text{ kg/m}^3$

Eau : vitesse de l'onde =  $1450 \text{ m/s}$

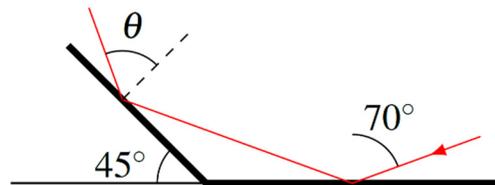
densité =  $1000 \text{ kg/m}^3$

6. Une onde lumineuse a une longueur d'onde de  $500 \text{ nm}$  dans le vide. Quelle sera la longueur d'onde de cette onde si elle entre dans l'eau (qui a un indice de réfraction de  $1,33$ ) ?

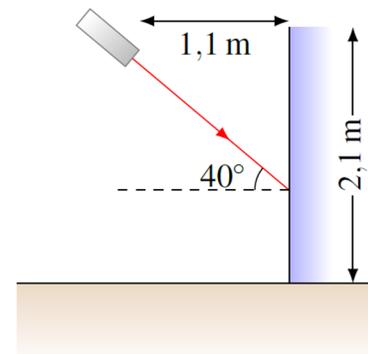
7. Une onde lumineuse a une longueur d'onde de 600 nm dans le vide et une longueur d'onde de 480 nm dans une substance transparente. Quelle est la vitesse de la lumière dans cette substance ?
8. Une onde lumineuse ayant une intensité de  $5 \text{ W/m}^2$  passe de l'air à l'eau ( $n = 1,33$ ). Quelles sont les intensités de la lumière transmise et réfléchi ?
9. La lumière se propageant dans l'air entre dans une substance transparente. On mesure alors que l'intensité de l'onde transmise est de 92% de l'intensité initiale. Quelle est l'indice de réfraction de cette substance ?

#### 4.4 La loi de la réflexion

10. Quel est l'angle  $\theta$  sur cette figure ?

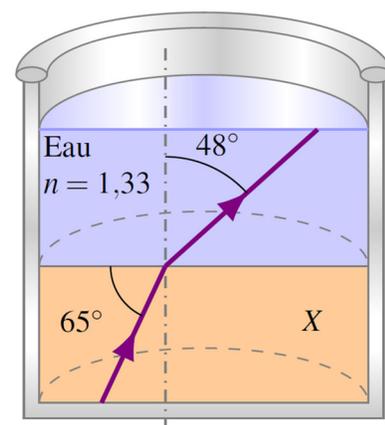


11. À quelle distance du mur le laser va-t-il toucher le sol dans la situation montrée sur la figure ?

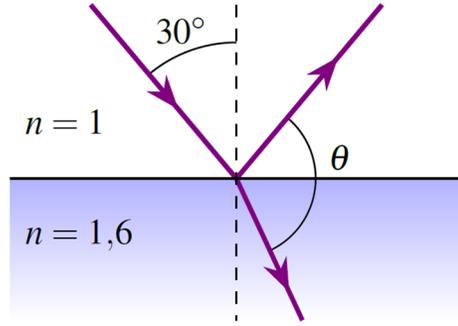


#### 4.5 La loi de la réfraction

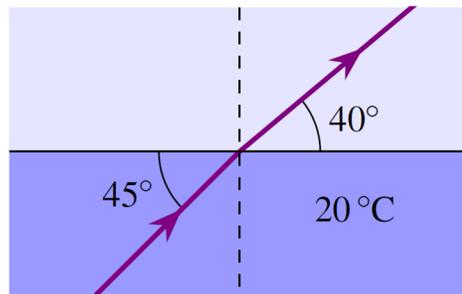
12. Un rayon lumineux passe d'une substance transparente  $X$  à l'eau telle qu'illustrée sur la figure.
- a) Quel est l'indice de réfraction de la substance  $X$  ?
  - b) Quelle est la vitesse de la lumière dans la substance  $X$  ?



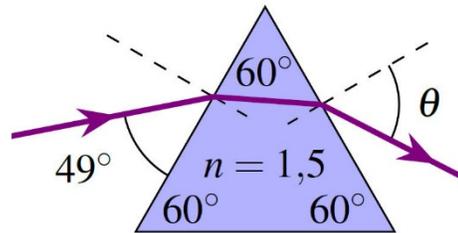
13. Quel est l'angle  $\theta$  sur cette figure ?



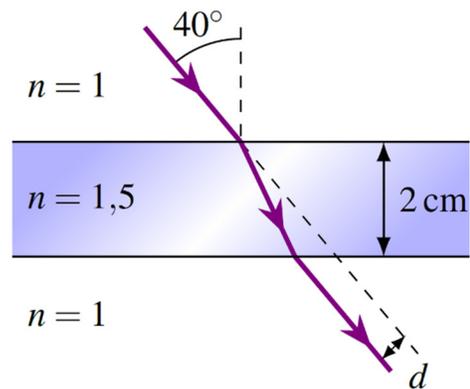
14. Une onde sonore se réfracte tel qu'illustré sur la figure en passant d'une région où l'air est à 20 °C à une région où l'air a une température différente. Quelle est la température de l'air de cette région ?



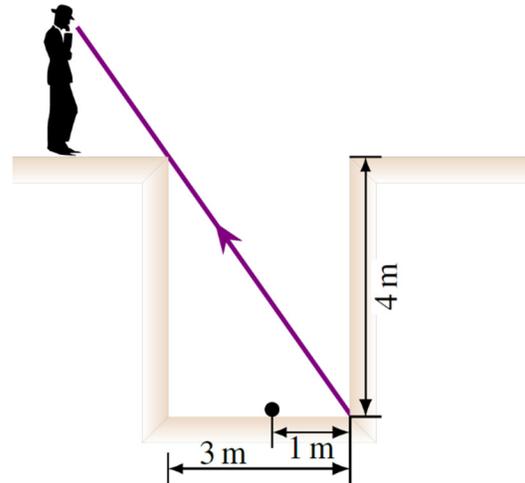
15. Un faisceau lumineux traverse un prisme. Quel est l'angle  $\theta$  sur cette figure ?



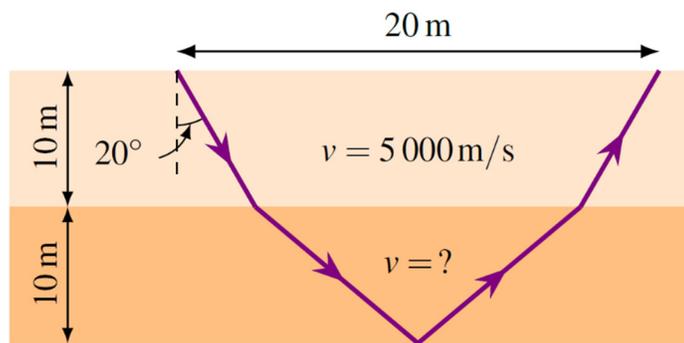
16. Un rayon lumineux traverse une plaque de verre telle qu'illustrée sur la figure. Après avoir traversé le verre, le faisceau est décalé d'une distance  $d$  par rapport à sa trajectoire initiale. Quelle est la valeur de  $d$  ?



17. Dans la situation montrée sur la figure, Sonia ne peut pas voir le point noir au fond du trou. Elle pourra cependant le voir quand on va complètement remplir le trou d'une substance transparente. Quel doit être l'indice de réfraction minimale de la substance pour que Sonia puisse voir le point noir au fond du trou ?



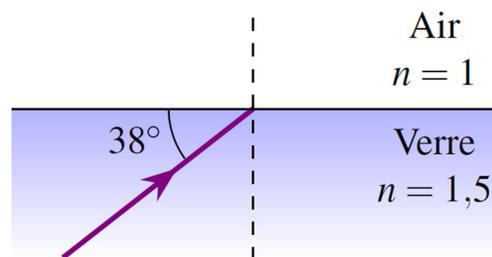
18. Une onde sismique se propage dans le sol. Toutefois, il y a un changement soudain de type de roche, tel qu'illustré sur la figure. À partir des informations données sur la figure, déterminez la vitesse de l'onde dans la roche la plus profonde.



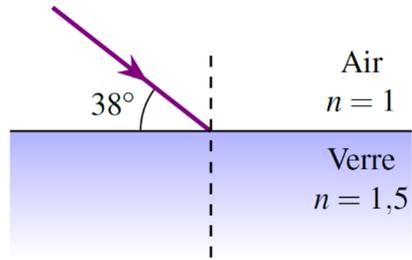
### 4.7 La réflexion totale

19. L'angle critique est de  $60^\circ$  quand la lumière arrive à l'interface entre une substance inconnue et de l'eau, en provenant de l'eau. Quelle est la vitesse de la lumière dans la substance inconnue ?

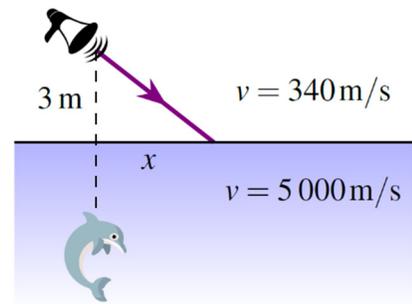
20. De la lumière arrive à une interface entre le verre et l'air tel qu'illustré sur la figure. Est-ce que la lumière fera une réflexion totale ou non ?



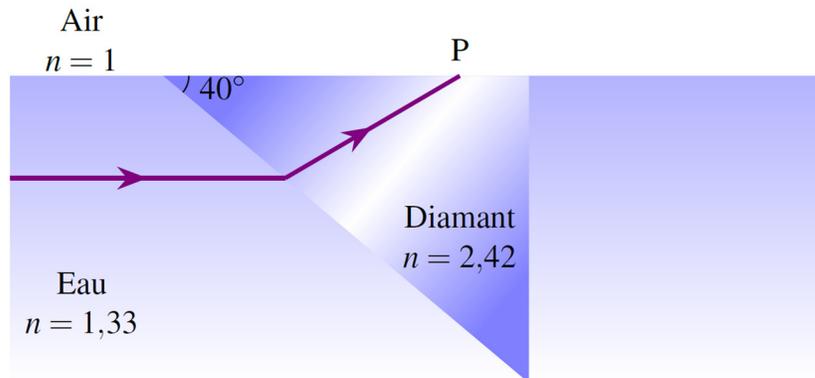
21. De la lumière arrive à une interface entre le verre et l'air tel qu'illustré sur la figure. Est-ce que la lumière fera une réflexion totale ou non ?



22. On veut communiquer avec un dauphin avec des ondes sonores. En utilisant les informations données sur la figure, déterminez jusqu'à quelle distance  $x$  le son pourra entrer dans l'eau.

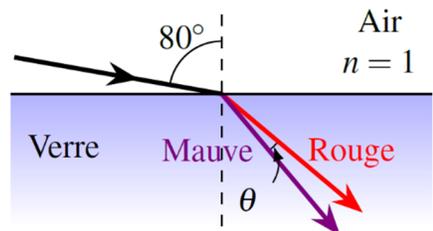


23. De la lumière passe de l'eau au diamant pour ensuite arriver, au point  $P$  à une interface entre le diamant et l'air tel qu'illustré sur la figure. Est-ce que la lumière fera une réflexion totale au point  $P$  ?



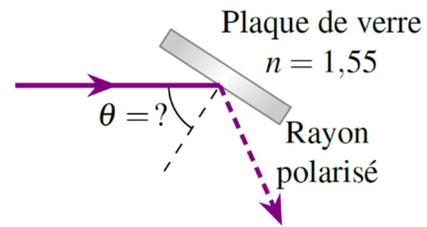
### 4.8 La dispersion

24. De la lumière blanche se propageant dans l'air arrive avec un angle d'incidence de  $80^\circ$  sur la surface d'un morceau de verre. En se réfractant dans le verre, les couleurs se séparent puisque l'indice de réfraction  $n$ 'est pas le même selon les couleurs. L'indice passe de  $1,66$  pour le mauve à  $1,62$  pour le rouge. Quel est l'angle entre le rayon mauve et le rayon rouge dans le verre ?

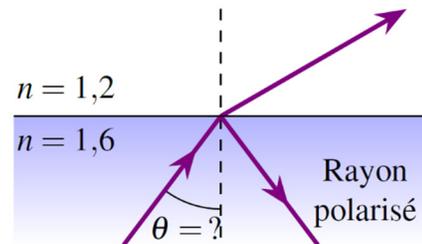


## 4.9 Polarisation par réflexion

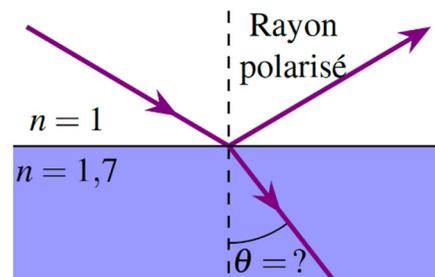
25. Quel doit être l'angle dans cette figure pour que le rayon réfléchi soit totalement polarisé ?



26. Quel doit être l'angle dans cette figure pour que le rayon réfléchi soit totalement polarisé ?



27. De la lumière se réfléchit sur une surface en verre ayant un indice de réfraction de 1,7. Quel est l'angle entre la normale et le rayon réfracté si le rayon réfléchi est totalement polarisé ?



28. De la lumière arrive à une interface entre deux milieux (et un des milieux n'est pas nécessairement de l'air). L'angle critique pour la réflexion interne est de  $48^\circ$ .

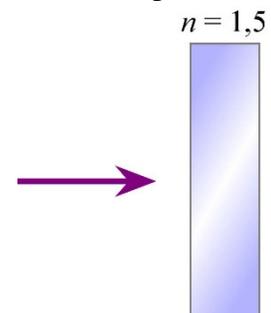
- Quel est l'angle de polarisation ?
- Pourrait-on avoir une réflexion totale totalement polarisée ?

### Défi

(Question plus difficile que les questions qu'il y aura à l'examen.)

29. De la lumière passe à travers une couche de verre. Sachant que la lumière peut faire de multiples réflexions entre les deux surfaces du verre, calculez les pourcentages de lumière transmise et réfléchi.

(Pour ceux qui connaissent un peu plus de physique, on va supposer qu'on utilise de la lumière blanche, ce qui signifie peut ignorer les effets de l'interférence (voir chapitre 6) puisqu'on a plusieurs longueurs d'onde.)



## RÉPONSES

### 4.2 Ondes sur une corde

1. a) 44,27 m/s   b) 221,4 Hz   c) 28 m/s   d) 221,4 Hz   e) 12,65 cm   f) 0,4427 kg/s  
g) 0,7 kg/s   h) On a une onde inversée ayant une amplitude de 1,126 mm   i)  
3,874 mm   j) 94,9 %
2. a) vers le haut   b) vers le bas   c) 12,65 m/s   d) 20 m/s
3.  $Z_2/Z_1 = 5,828$

### 4.3 Ondes arrivant perpendiculairement sur une surface

4. a) 442,4 kg/m<sup>2</sup>s   b) 1 520 000 kg/m<sup>2</sup>s   c) Non, puisque l'impédance de l'eau est trop différente de celle de l'air (3435 fois plus grande)
5. a) Onde transmise : 30,7 dB   onde réfléchie 59,99 dB
6. 375,9 nm
7.  $2,4 \times 10^8$  m/s
8. Transmis : 4,9 W/m<sup>2</sup>   Réfléchi : 0,1 W/m<sup>2</sup>
9. 1,7888

### 4.4 La loi de la réflexion

10. 65°
11. 1,403 m

### 4.5 La loi de la réfraction

12. a) 2,34   b)  $1,28 \times 10^8$  m/s
13. 131,8°
14. 70,9 °C
15. 57,16°
16. 5,59 mm
17. 1,342
18. 7846 m/s

### 4.7 La réflexion totale

19.  $2,60 \times 10^8$  m/s
20. Il y a réflexion totale.
21. Il n'y a pas de réflexion totale.
22. 20,45 cm
23. Il y a réflexion totale.

## 4.8 La dispersion

24.  $1,05^\circ$

## 4.9 Polarisation par réflexion

25.  $57,2^\circ$

26.  $36,9^\circ$

27.  $30,5^\circ$

28. b)  $36,6^\circ$     b) Non

## Défi

29. Transmis :  $92,31\%$     Réfléchi :  $7,69\%$