

Chapitre 01

Bases de l'optique géométrique

Comment fonctionne une fibre optique?

La fermeture du réseau cuivre d'Orange accélère, les inquiétudes montent

Démodé par la fibre optique, le réseau historique de l'opérateur doit s'éteindre en 2030. Un chantier à hauts risques.

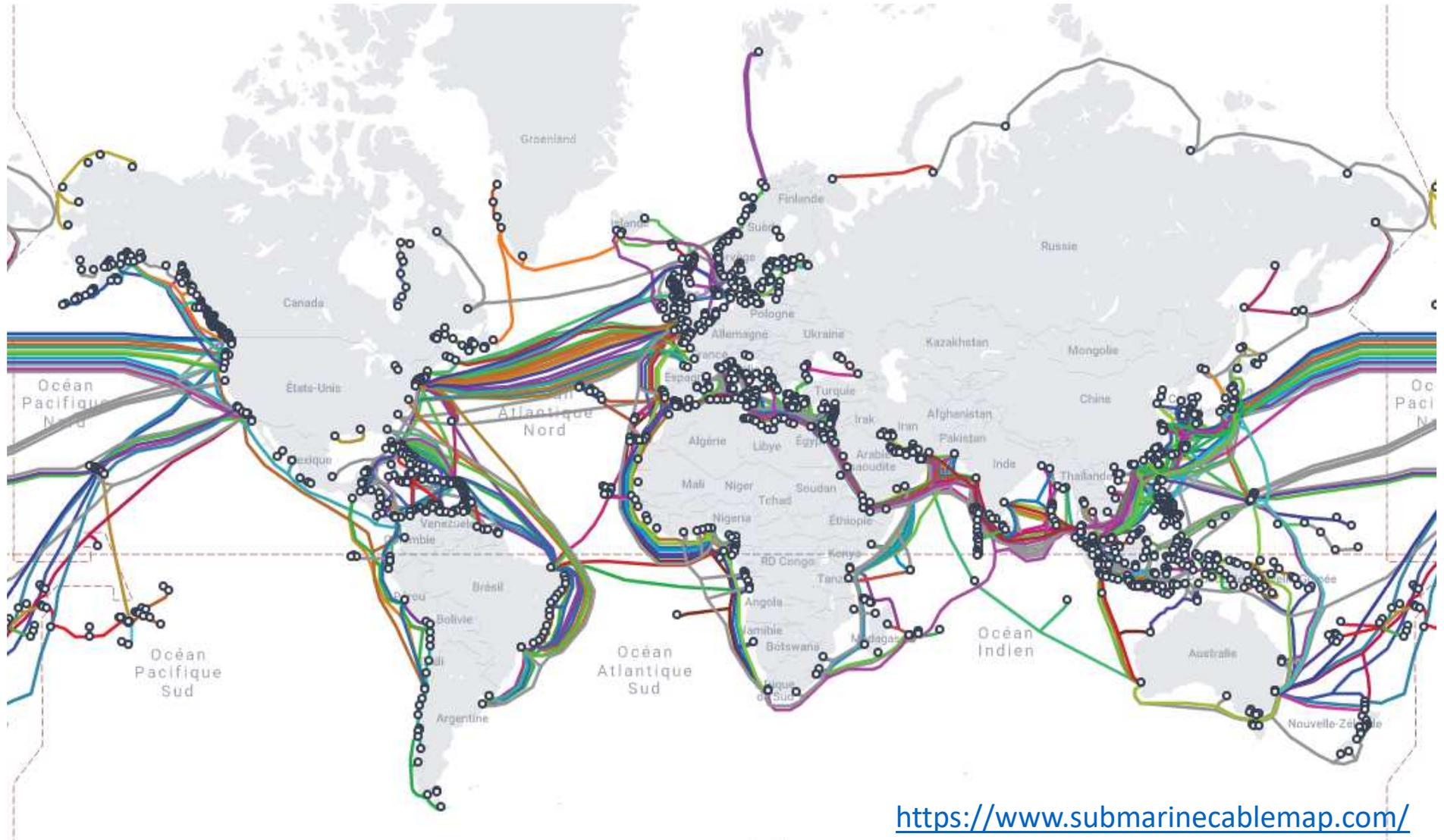
Par Olivier Pinaud

Publié le 08 novembre 2023 à 15h00 · 🕒 Lecture 3 min.

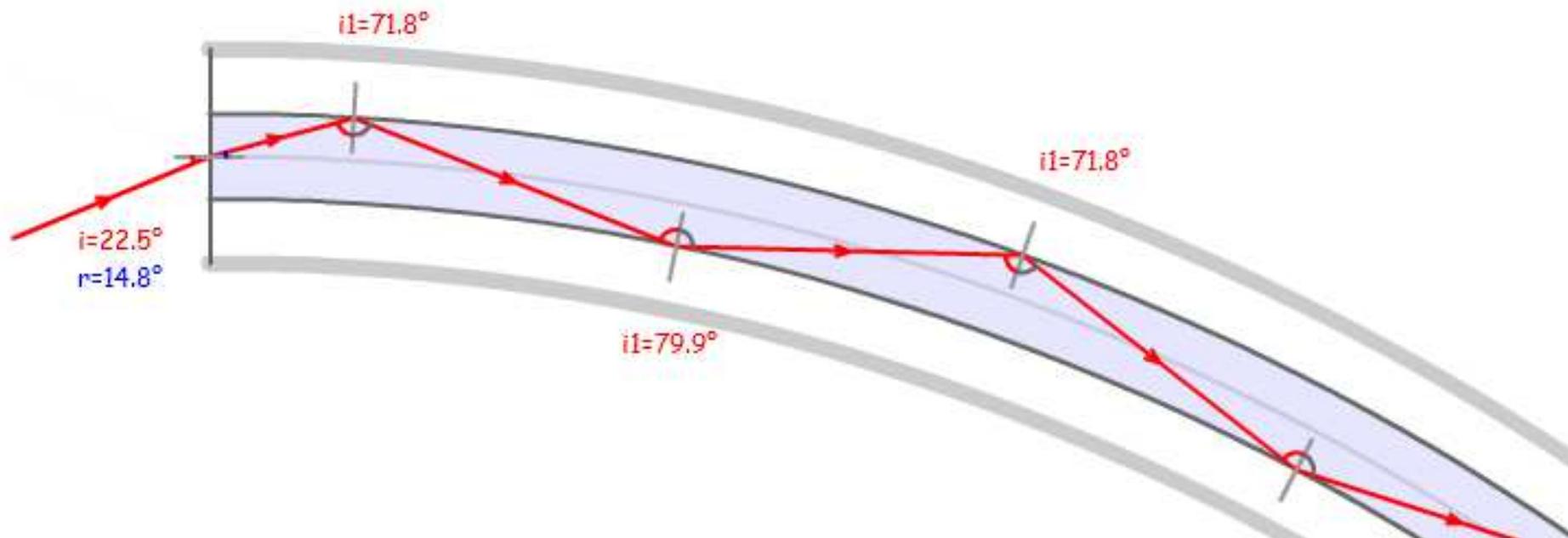


https://www.lemonde.fr/economie/article/2023/11/08/la-fermeture-du-reseau-cuivre-d-orange-accelere-les-inquietudes-montent_6198988_3234.html

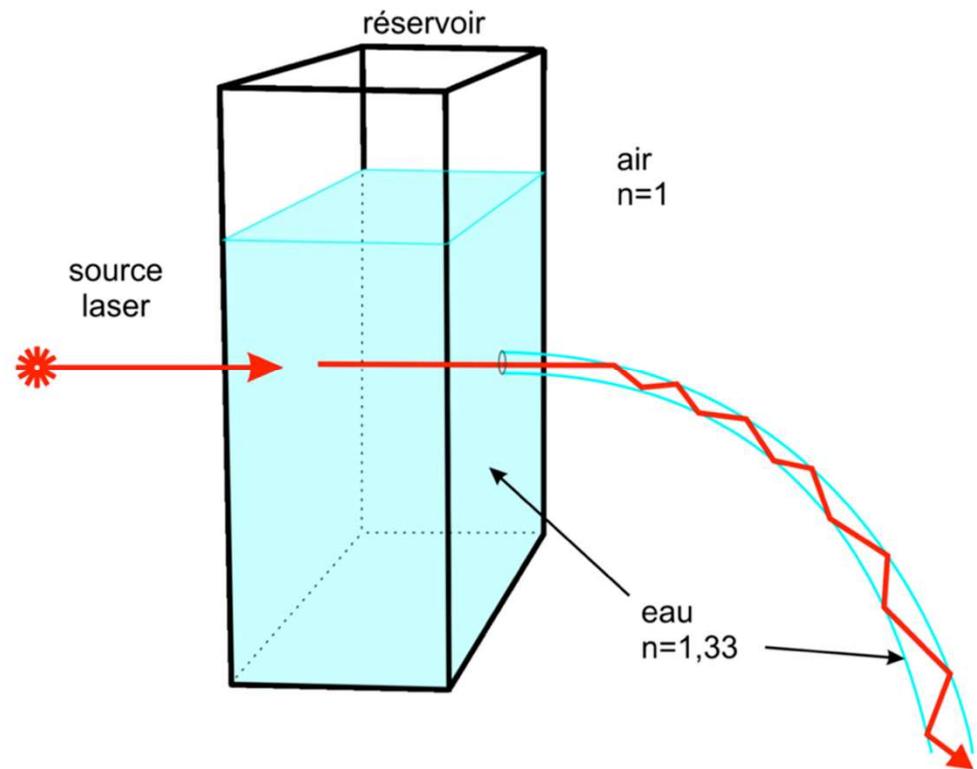
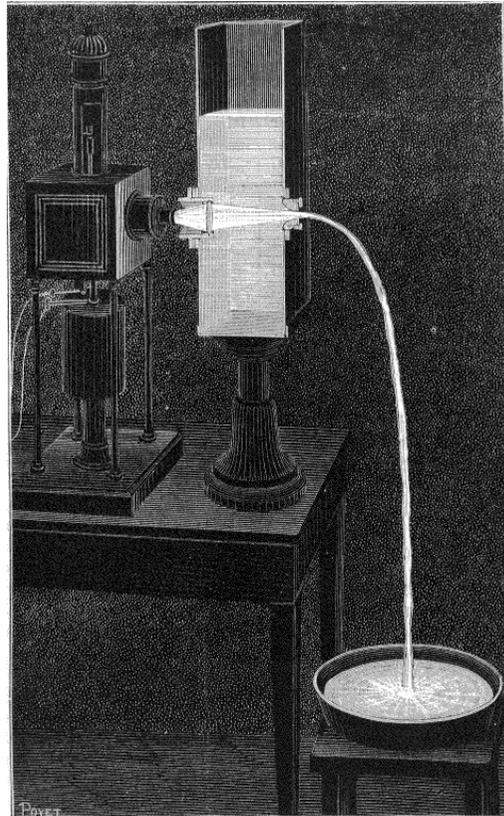
Fibres sous-marines



Principe de la fibre optique



Principe de la fibre optique rien de neuf!



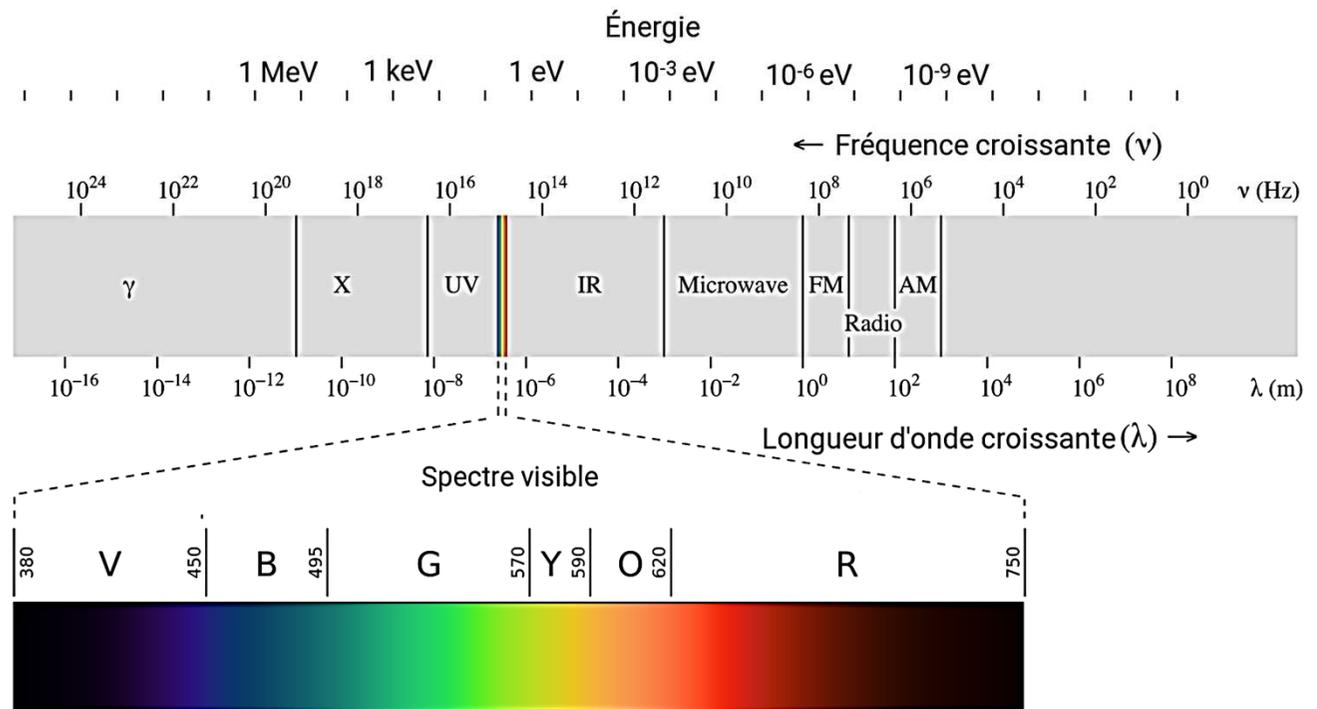
<https://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/fontaine-laser.xml>

Quelques propriétés de la lumière

Quelques propriétés de la lumière : son spectre



Sir Isaac Newton experimenting with a prism. Engraving after a picture by J.A. Houston, ca. 1870.



https://fr.wikipedia.org/wiki/Spectre_visible#/media/Fichier:EM_spectrumrevised_fr.png

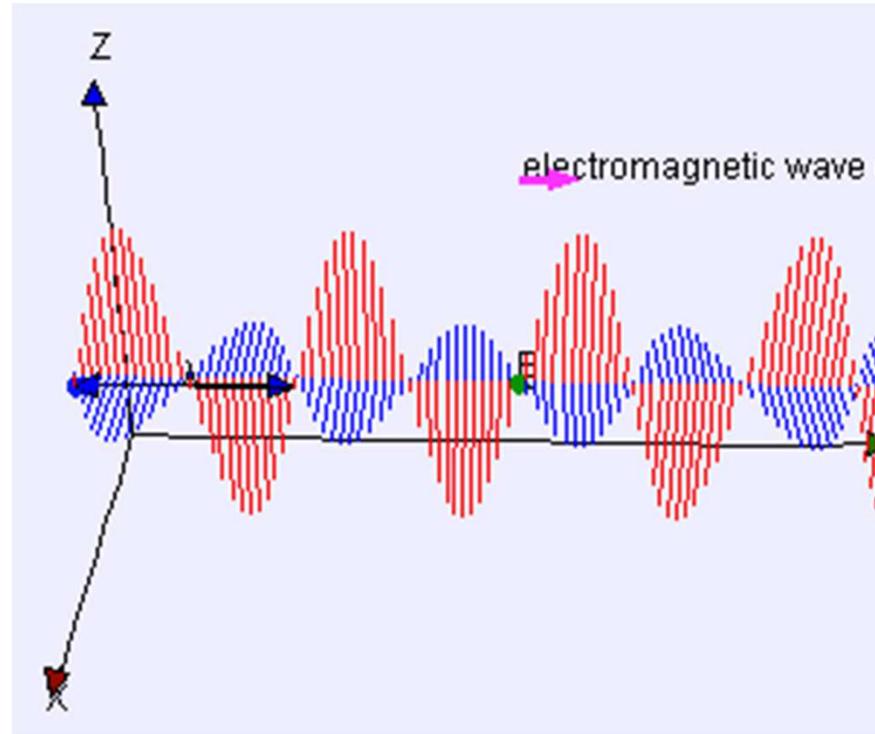
Quelques propriétés de la lumière : son spectre

Propriété : Double périodicité

La **longueur d'onde** λ (exprimée en mètre) et la **fréquence** (exprimée en hertz) d'une onde lumineuse sont reliées par la relation suivante :

$$\lambda \cdot f = v_{\text{onde}}$$

où v_{onde} est la célérité de l'onde (sa vitesse de propagation) exprimée en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

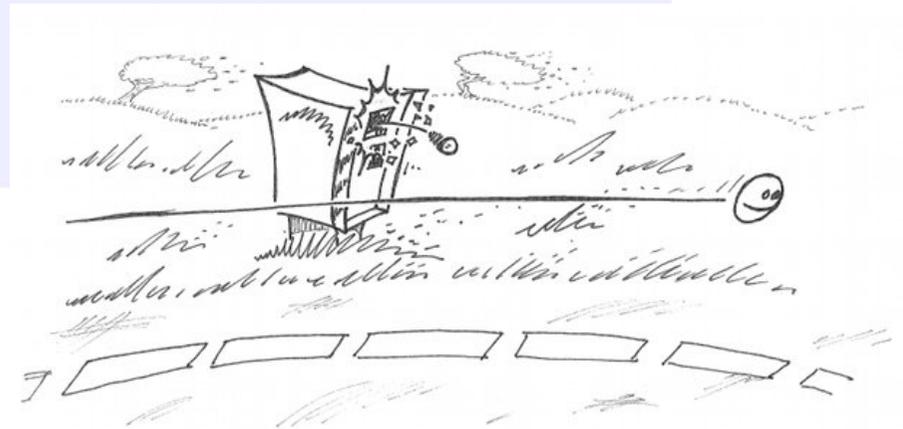
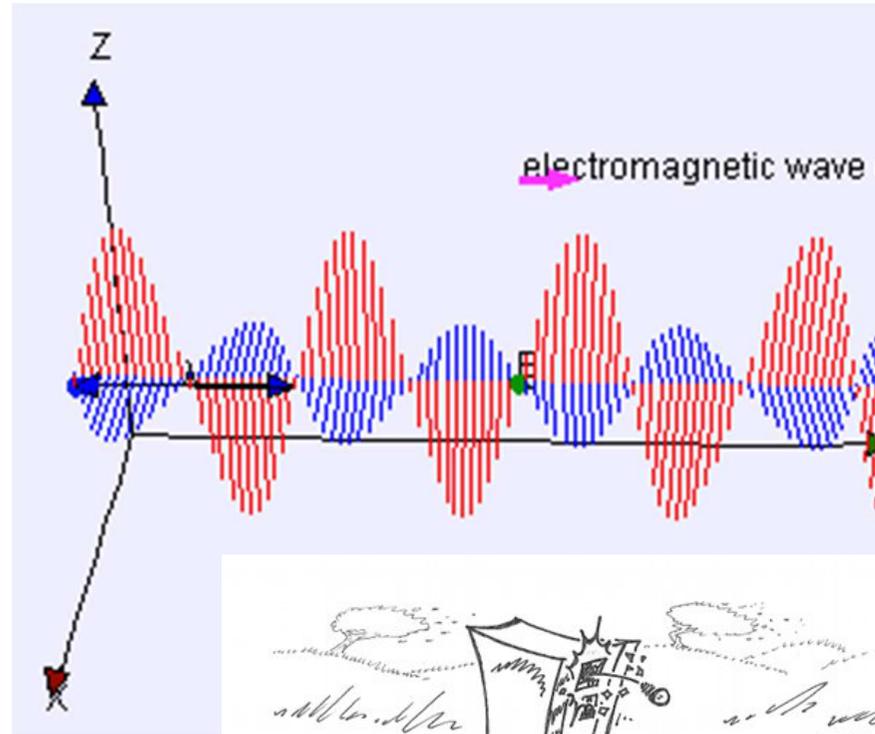


Quelques propriétés de la lumière : sa célérité

Définition : Célérité de la lumière dans le vide

Dans le **vide**, la lumière se propage avec une **célérité constante** indépendante de la fréquence et du référentiel d'étude. La célérité de la lumière dans le vide vaut :

$$c = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$



Crédit : B. Mollier

Quelques propriétés de la lumière : sa célérité

Oui mais dans la fibre optique?

Quelques propriétés de la lumière : sa célérité

Oui mais dans la fibre optique?

→ Hypothèses simplificatrice :

MLTHI

Définition : Caractéristiques du milieu de propagation

Linéaire : Une onde sinusoïdale incidente de fréquence ν (de pulsation $\omega = 2\pi.\nu$) reste sinusoïdale de même fréquence (pulsation) lors de la traversée d'un milieu linéaire.

Transparent : Le terme transparent fait référence ici à un milieu non absorbant. L'amplitude de l'onde ne diminue donc pas lors de sa propagation dans le milieu.

Homogène : Les propriétés du milieu sont les mêmes en tout point de l'espace.

Isotrope : Les propriétés du milieu sont les mêmes dans toutes les directions.

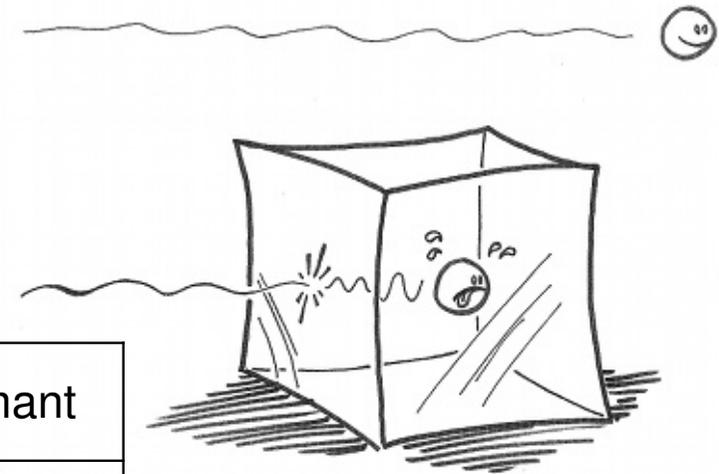
Quelques propriétés de la lumière : sa célérité

Définition : Indice optique

Dans un MLTHI, la lumière se propage avec une célérité v_{milieu} inférieure à c . Afin de quantifier cette diminution, on introduit l'**indice optique n** du milieu (ou indice de réfraction) :

$$n = \frac{c}{v_{\text{milieu}}}$$

| Milieu | vide | air | eau | plexiglas | verre crown | verre flint | diamant |
|--------------------|------|-----------------------|-----|-----------|-------------|-------------|---------|
| Indice optique n | 1 | 1,0003 ≈ 1 | 1,3 | 1,5 | 1,52 | 1,67 | 2,4 |



Savoir-faire 1 – Relier la longueur d'onde dans le vide et la couleur

Considérons un faisceau issu d'une diode laser de longueur d'onde 532 nm.

1. Éclairons une feuille avec cette diode laser : de quelle couleur est la tâche observée ?

Le faisceau laser est ensuite envoyé dans un morceau de plexiglas d'indice $n = 1,51$.

2. Calculer la longueur d'onde dans le plexiglas.

3. À quelle couleur cela correspond-t-il ? Expliquer.

Quelle lumière faire rentrer dans
la fibre?

Classification des sources lumineuses

Définition : Classification des sources lumineuses

- Les sources **primaires** émettant leurs propres lumières des sources **secondaires** renvoyant la lumière qu'il reçoit ;

Lampes, Soleil, flamme... VS. Lune, murs, écran du vidéoproj, vous...

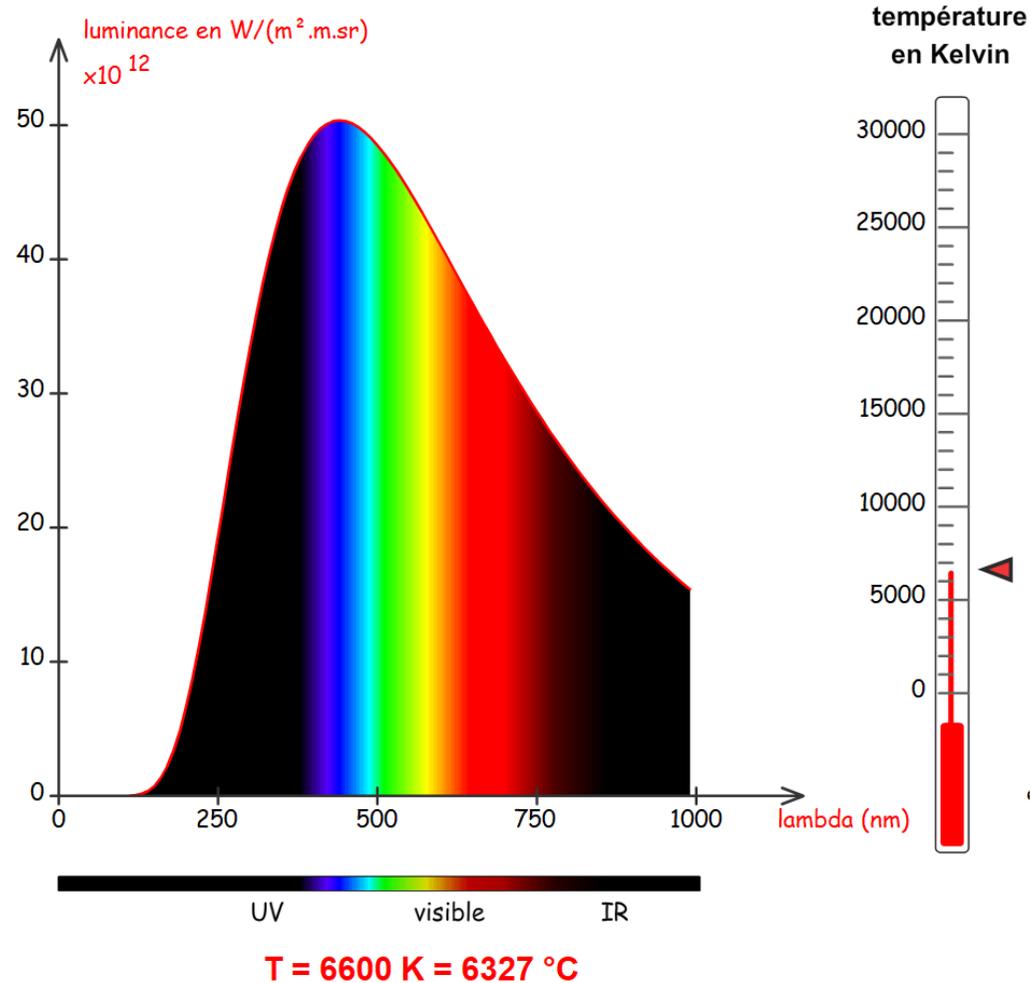
- Les sources **ponctuelles**, dont le diamètre apparent très faible permet de les assimiler à des points, des sources **étendues**, décomposables en une infinité de sources ponctuelles ;

Étoiles, lampadaires lointain... VS. écran, lampe proche...

- Les sources **monochromatiques**, dont le spectre ne contient qu'une seule radiation, des sources **polychromatiques**.

Laser, lampe spectrale filtrée... VS. flamme, ampoule à incandescences, lampe spectrale...

Lampe à incandescence: Rayonnement du corps noir



Source spectrale :

Spectres d'émission et d'absorption des éléments

The diagram illustrates the experimental setup for observing emission and absorption spectra. It consists of a power source with 'ON' and 'OFF' buttons, a gas source (GAZ), a slit (Fente), a lens (Lentille), a diffraction grating (Réseau), and a screen (Écran). Light from the gas source passes through the slit, is focused by the lens, and is dispersed by the grating onto the screen.

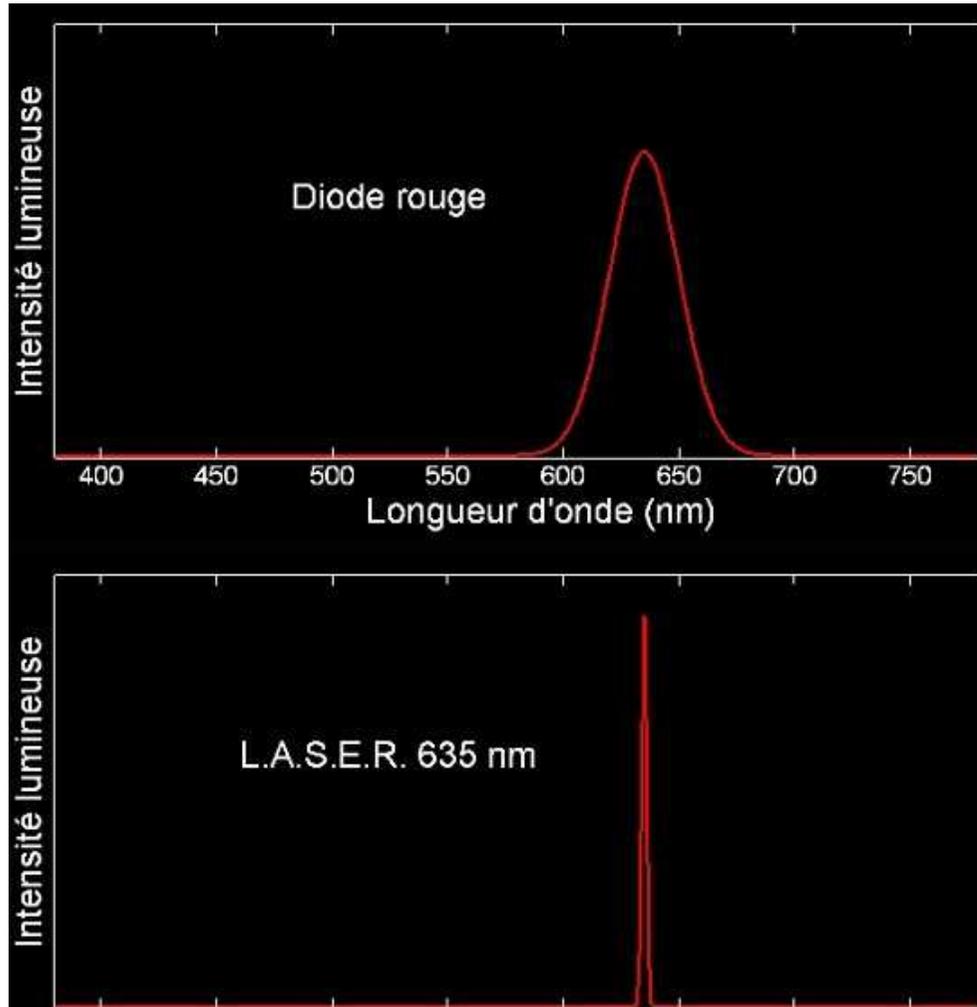
Two spectra are shown:

- Hydrogène (H):** Shows a discrete emission spectrum with several distinct colored lines (violet, blue-violet, blue-green, yellow-green, red) against a dark background.
- He (Helium):** Shows a continuous emission spectrum with a full range of colors (violet, blue, green, yellow, red) against a dark background.

Labels 'H' and 'He' are placed below their respective spectra. The word 'Hydrogène' is written in large letters below the H spectrum. A button 'Réinitialiser le zoom' is located at the bottom right. The text 'Cliquer-glisser pour zoomer' is also present.

https://physique.ostralo.net/spectre_em_abs/

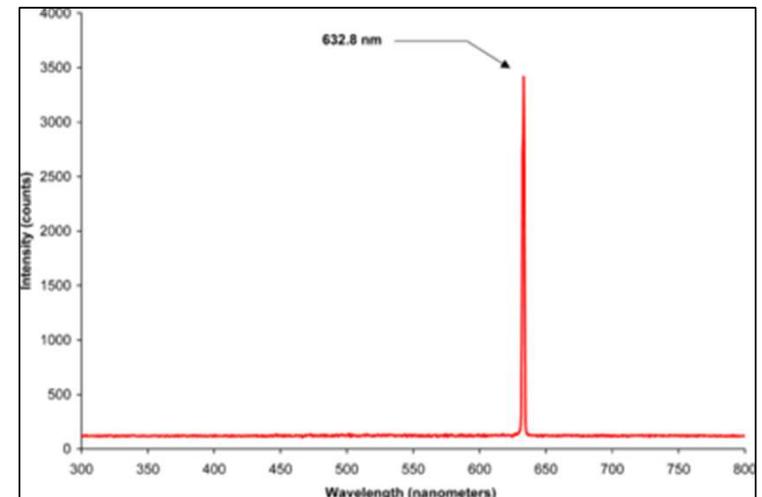
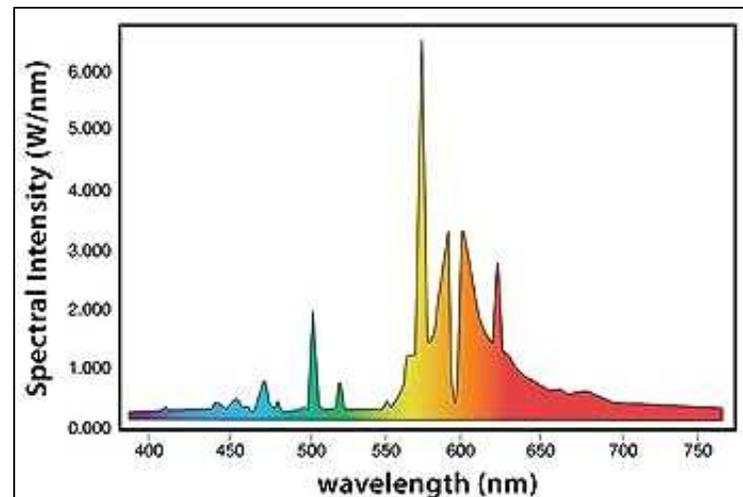
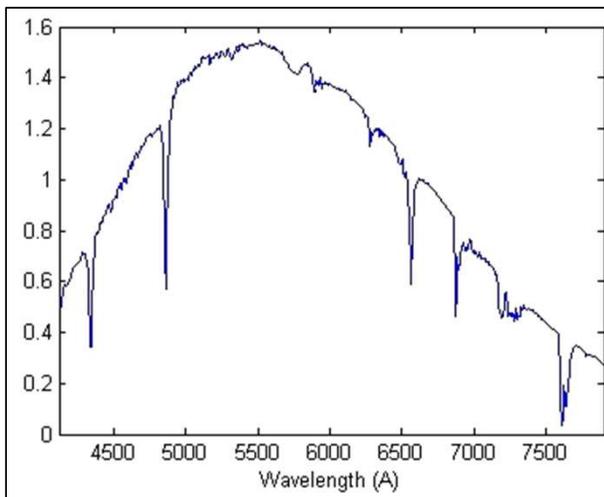
Source laser :



➔ Bonne approximation :
Source ponctuelle
monochromatique
unidimensionnelle

Savoir-faire 2 – Caractériser une source lumineuse par son spectre

1. Parmi ces trois spectres, lequel est celui d'une étoile, d'un laser, d'une lampe à vapeur de sodium ?
2. Comment peut-on expliquer les fluctuations du spectre **a)** ?

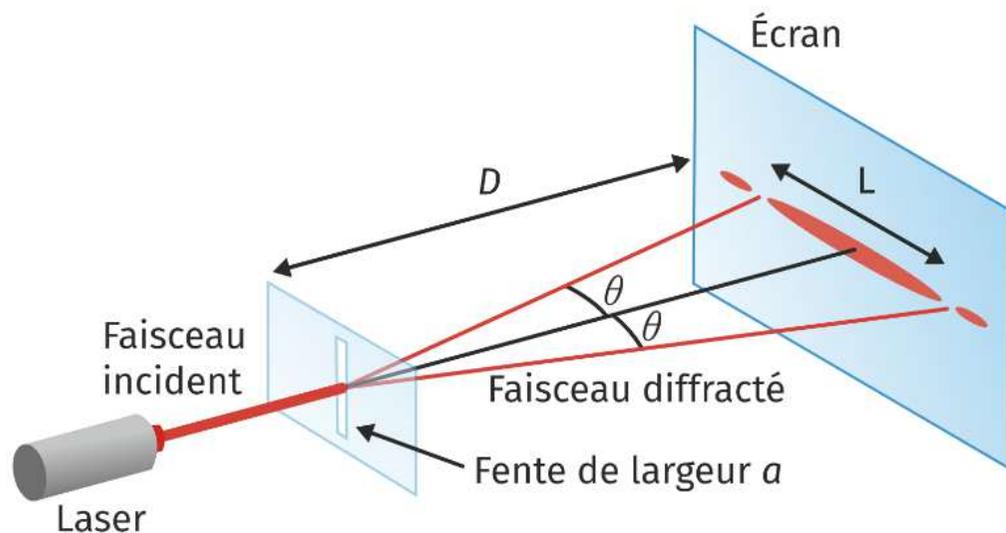


3. Optique géométrique

Modèle de l'optique géométrique

Lumière = onde !

→ Phénomène de diffraction



Crédits : lelivrescolaire.fr

Si la diffraction est négligeable



Propagation rectiligne



Rayons lumineux

(plus simple à manipuler)

Modèle de l'optique géométrique

Définition : Hypothèses associées à l'utilisation des rayons lumineux

Dans le cadre de l'optique géométrique, la propagation de l'énergie lumineuse est décrite à l'aide de la notion de rayon lumineux vérifiant les propriétés suivantes :

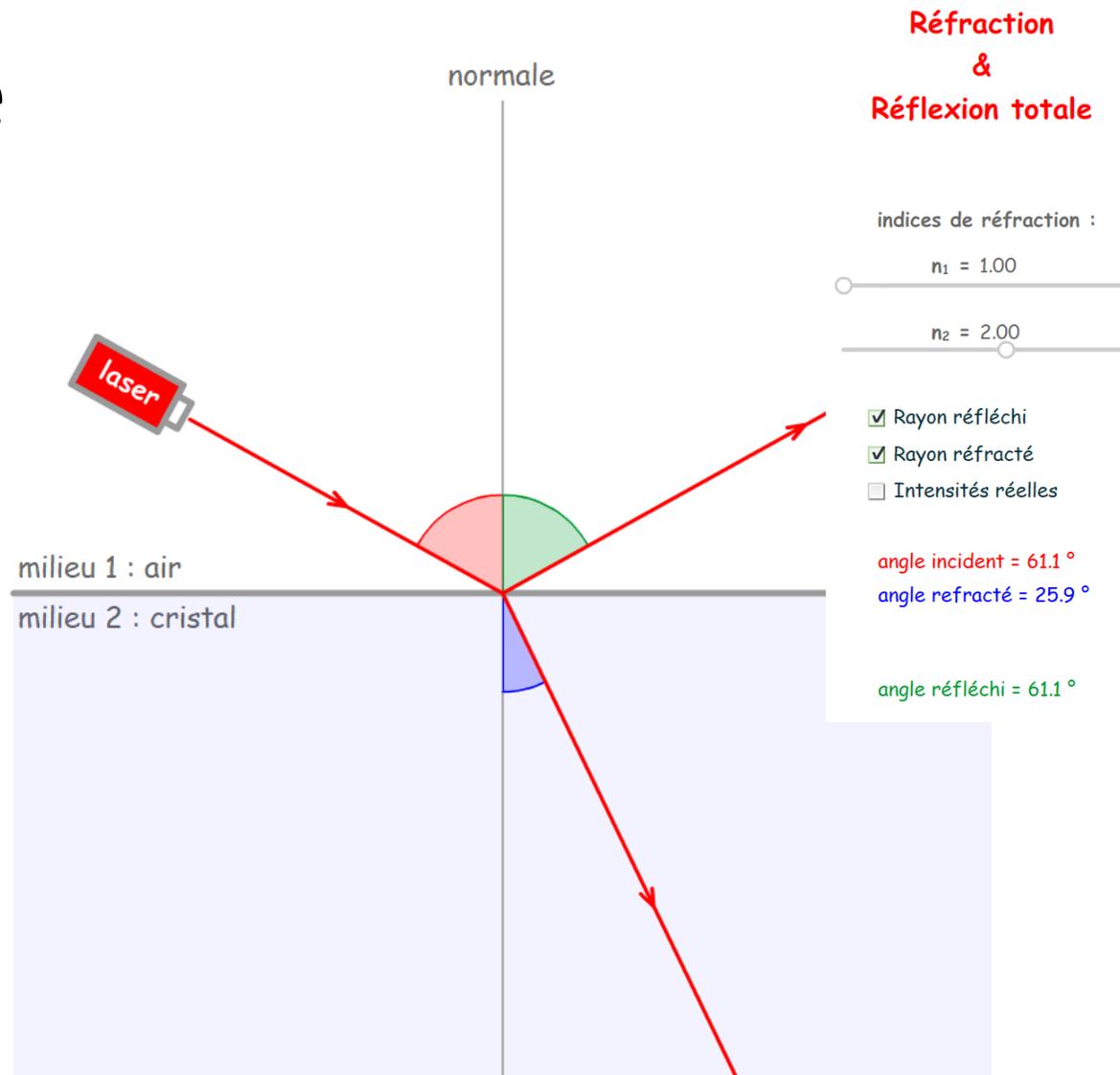
- **Propagation rectiligne** : dans un milieu linéaire, transparent, homogène et isotrope, les rayons lumineux se propagent en ligne droite.
- **Principe de retour inverse de la lumière** : le trajet suivi entre deux points lumineux situés sur le même rayon lumineux est indépendant du sens de propagation.
- **Indépendance des rayons lumineux** : il n'y a pas de phénomènes d'interférences, les rayons lumineux qui se croisent n'interagissent pas entre eux, ils se propagent de façon entièrement indépendante.

Savoir-faire 3 – Indiquer les limites du modèle de l'optique géométrique

En TP d'optique, nous utiliserons des lentilles dont le diamètre typique sera de l'ordre de 5 cm. La longueur des bancs ne dépassera pas 2 m.

1. Donner la taille angulaire de la tache de diffraction due à un diaphragme de 5 cm. On travaillera dans le visible, avec $\lambda_0 \approx 500$ nm.
2. En déduire l'élargissement du faisceau au bout de 2 m. Le comparer aux plus petits détails visibles à l'œil nu (de l'ordre du dixième de millimètre).
3. Conclure sur la nécessité de prendre en compte la diffraction au laboratoire d'optique.

Lois de Snell-Descarte



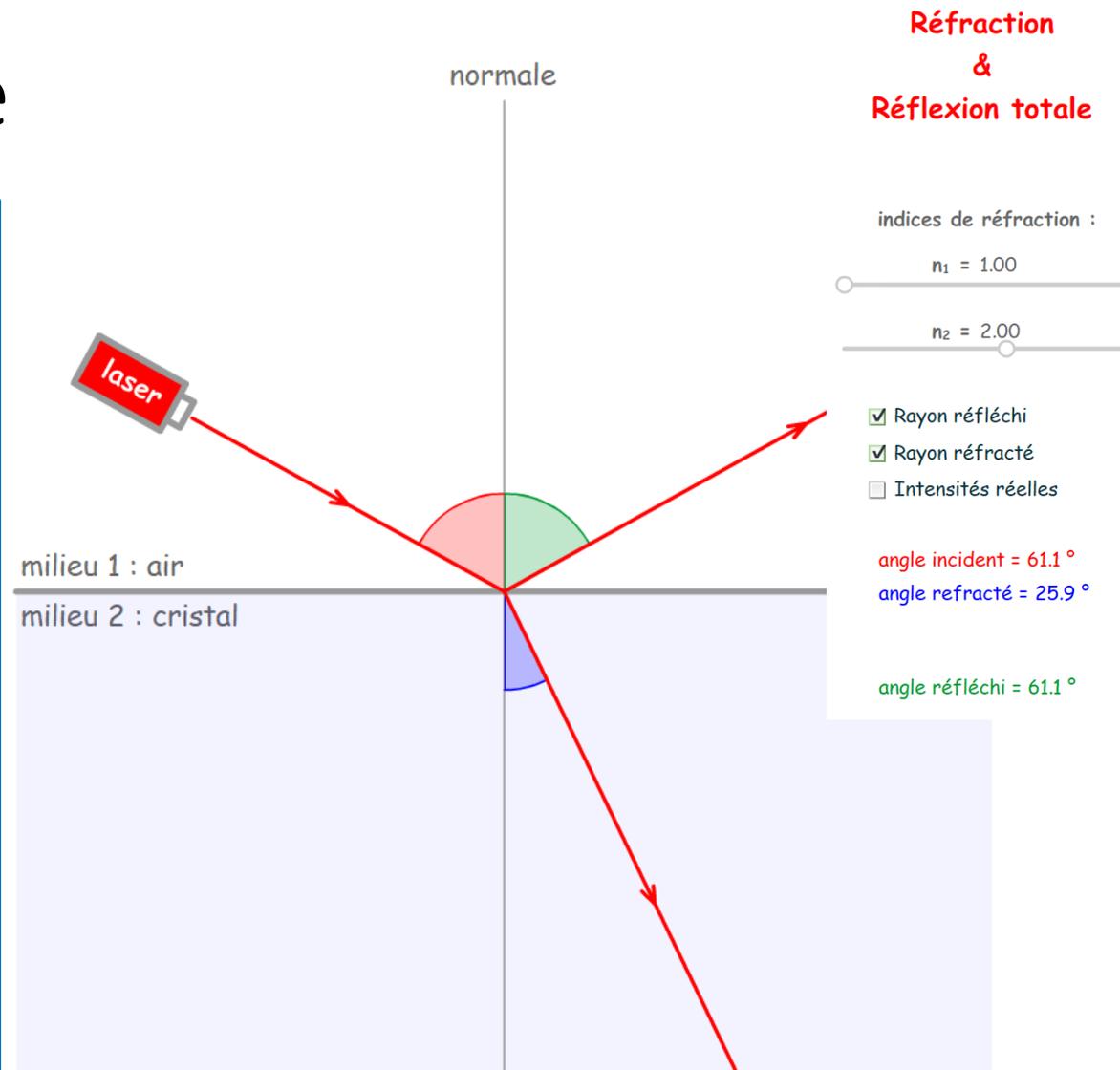
Lois de Snell-Descarte

Loi : Lois de Snell-Descartes

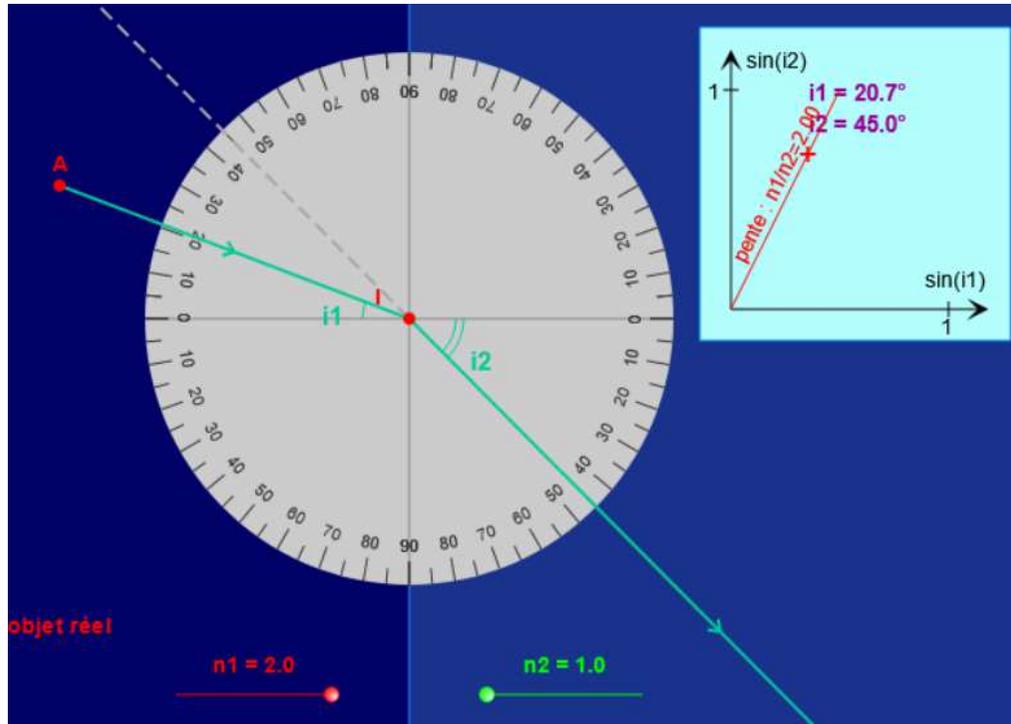
1. Les rayons réfléchi et réfracté sont situés dans le plan d'incidence.
2. Loi de la réflexion :
L'angle d'incidence i_1 est l'opposé de l'angle de réflexion r : $i_1 = -r$.
3. Loi de la réfraction :
L'angle d'incidence i_1 et l'angle de réfraction i_2 satisfont la relation suivante :

$$n_1 \cdot \sin(i_1) = n_2 \cdot \sin(i_2)$$

avec n_1 (n_2) l'indice optique du milieu de propagation du rayon incident (réfracté).



Lois de Snell-Descartes



Détermination expérimentale de l'indice optique du matériau composant le demi-cylindre

Loi : Lois de Snell-Descartes

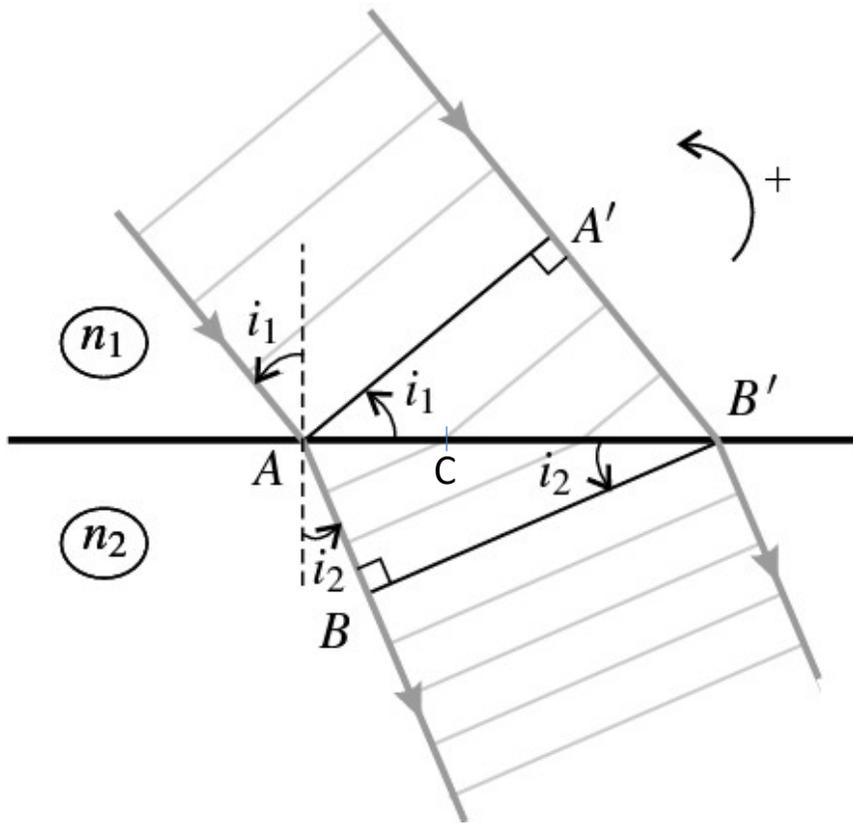
3. Loi de la réfraction :

L'angle d'incidence i_1 et l'angle de réfraction i_2 satisfont la relation suivante :

$$\sin(i_2) = \frac{n_1}{n_2} \cdot \sin(i_1)$$

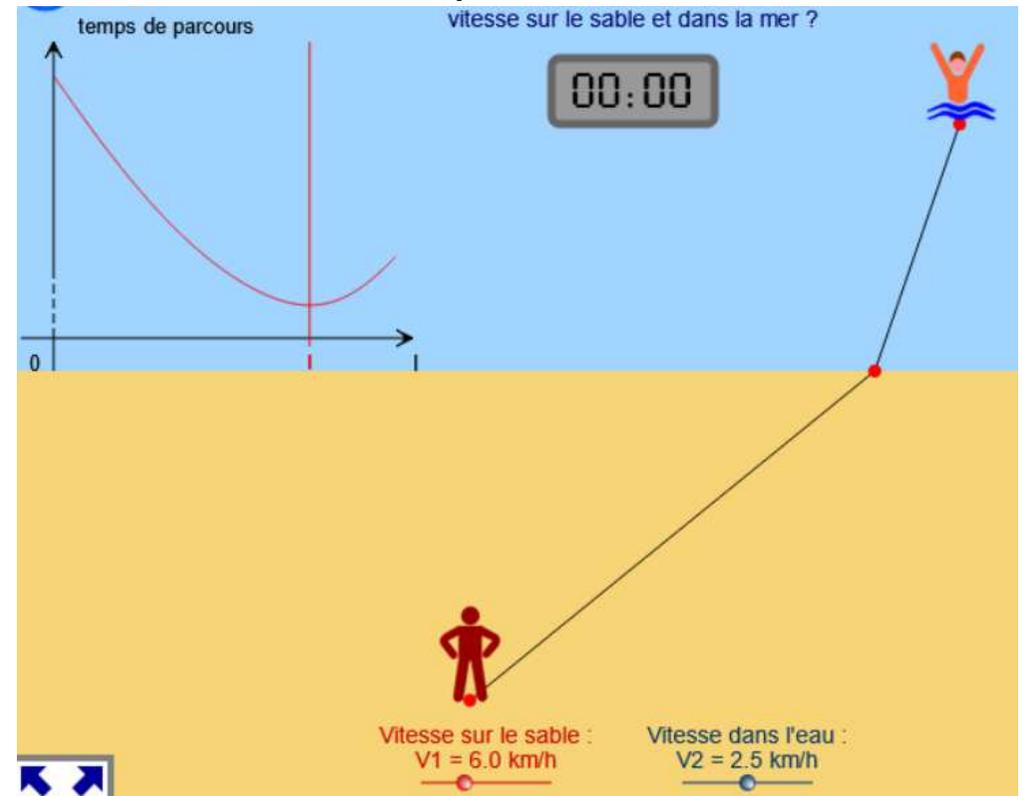
avec n_1 (n_2) l'indice optique du milieu de propagation du rayon incident (réfracté).

« Explications » de la loi de la réfraction



https://fr.m.wikiversity.org/wiki/Fichier:R%C3%A9fraction_-_optique_ondulatoire.jpg

Principe de Fermat



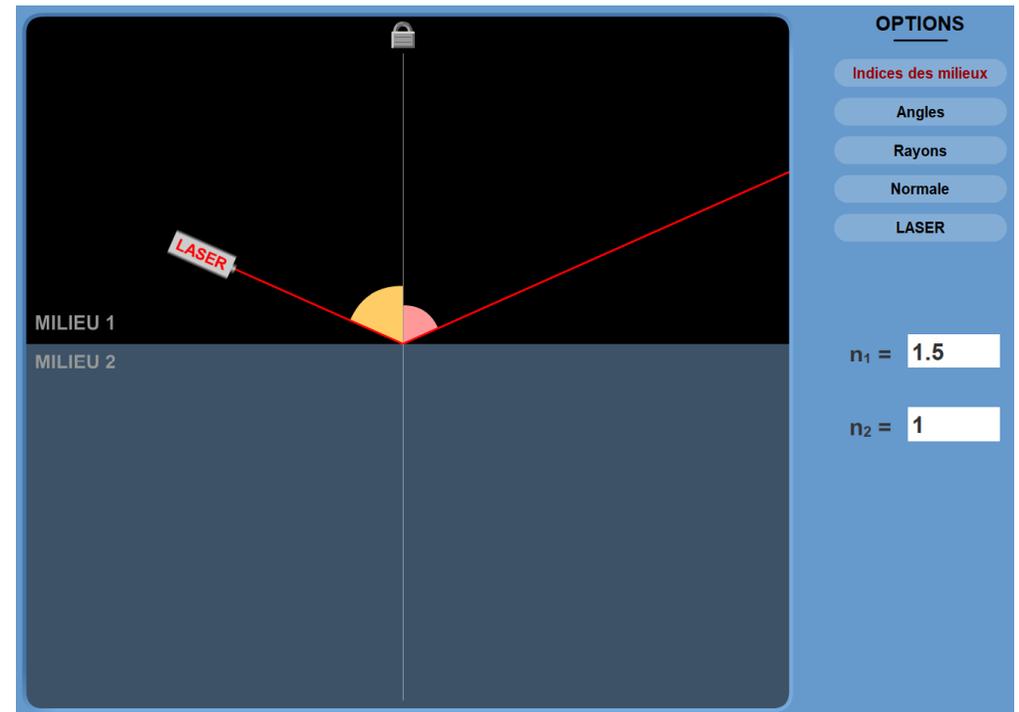
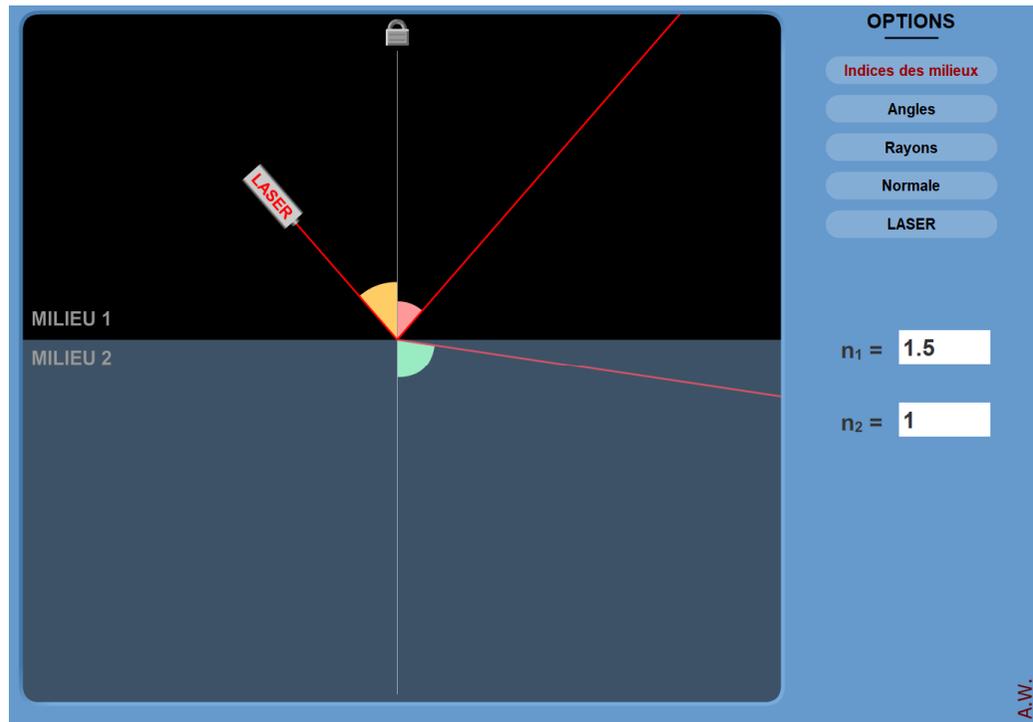
<https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/optiqueGeo/dioptres/Fermat0.php>

Savoir-faire 4 – Appliquer les lois de Descartes

Un faisceau de lumière monochromatique de longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$ passe de l'air à un prisme en verre crown. L'angle d'incidence vaut $i_1 = 30^\circ$.

1. Faire un schéma légendé dans le plan d'incidence en précisant si le rayon réfracté se rapproche ou s'écarte de la normale.
2. Calculer l'angle de réfraction i_2 .
3. On remplace le verre par un bloc de diamant. L'angle de réfraction vaut alors $i'_2 = 12^\circ$. Calculer l'indice de réfraction du diamant.

Lien avec la fibre: réflexion totale



→ Existence d'un ***angle limite*** pour lequel il n'y a plus de rayon réfracté

Savoir-faire 5 – Etablir la condition de réflexion totale (démonstration à connaître).

Si la lumière passe dans un milieu moins réfringent ($n_2 < n_1$), il se peut qu'il n'existe aucun rayon réfracté. Toute la lumière est alors réfléchie.

1. Trouver l'angle limite à partir duquel il n'existe plus de rayon réfracté.

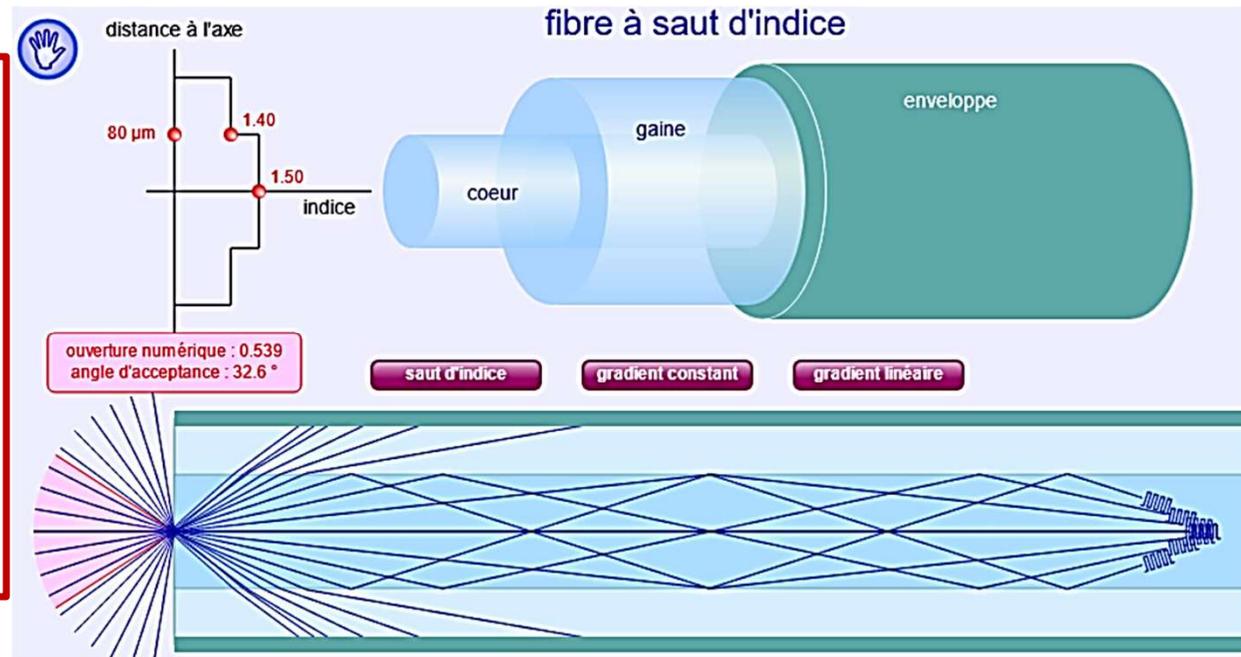
Propriétés d'une fibre optique

C'est quoi une fibre optique ?

Définition : Fibre optique

Une **fibre optique** est formée de deux milieux transparents : le "**cœur**", cylindrique, d'indice constant ou variable, entouré par la "**gaine**", d'indice plus petit.

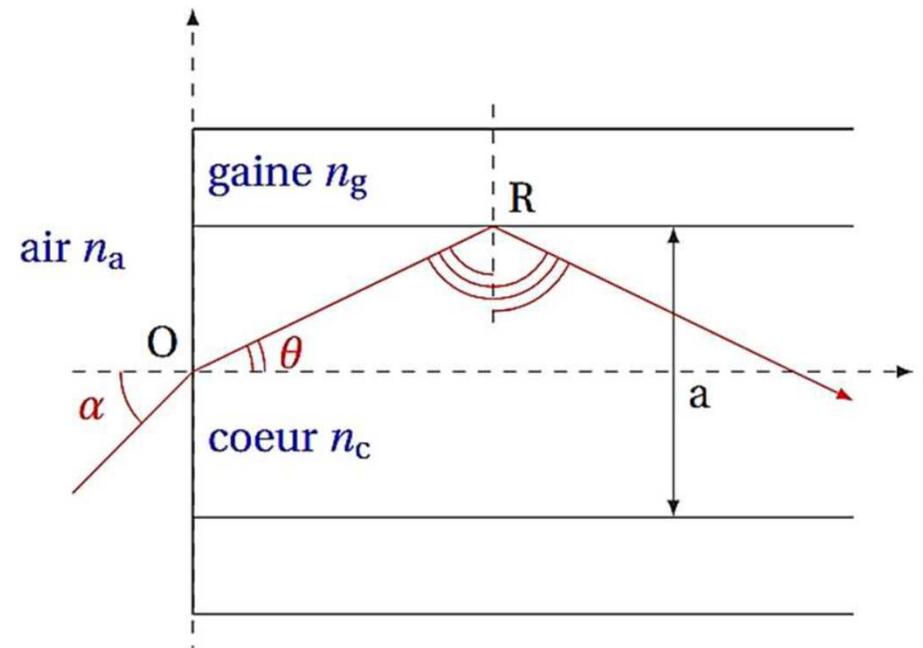
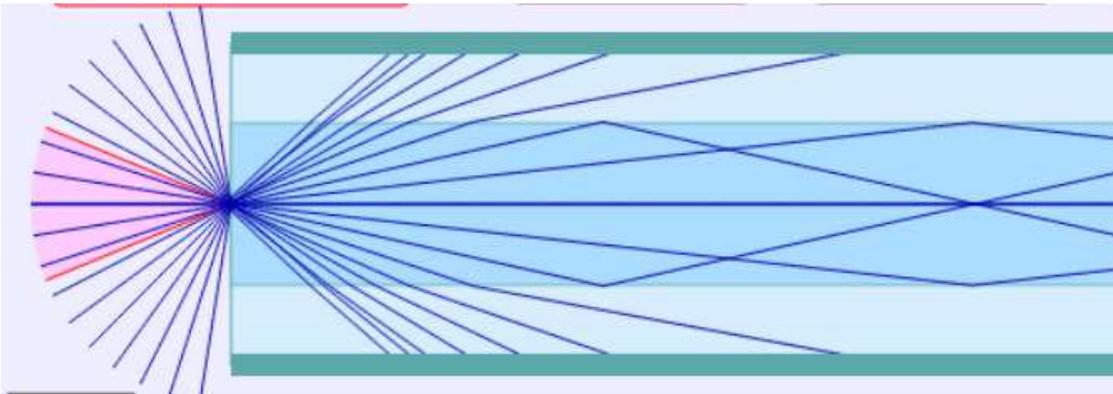
Elle a la propriété de conduire la lumière et sert pour la fibroscopie, l'éclairage ou la transmission de données numériques.



Cône d'acceptance d'une fibre

Définition : Cône d'acceptance

Le "**cône d'acceptance**" représente l'angle dans lequel un rayon incident est transmis dans la fibre. Il est défini par son sinus, appelé "**ouverture numérique**". Cette quantité ne dépend que des indices de la gaine et du cœur.



Savoir-faire 6 – Etablir l'expression du cône d'acceptance d'une fibre à saut d'indice

Une fibre à saut d'indice est formée d'un cœur cylindrique d'axe OX et de diamètre a , homogène et isotrope d'indice de réfraction n_c , entourée d'une gaine homogène et isotrope d'indice de réfraction $n_g < n_c$. La fibre est limitée à ses extrémités par deux plans perpendiculaires à OX. L'indice de l'air est noté n_a inférieur à n_c et n_g . On étudie la propagation d'un rayonnement monochromatique dans le plan XOY.

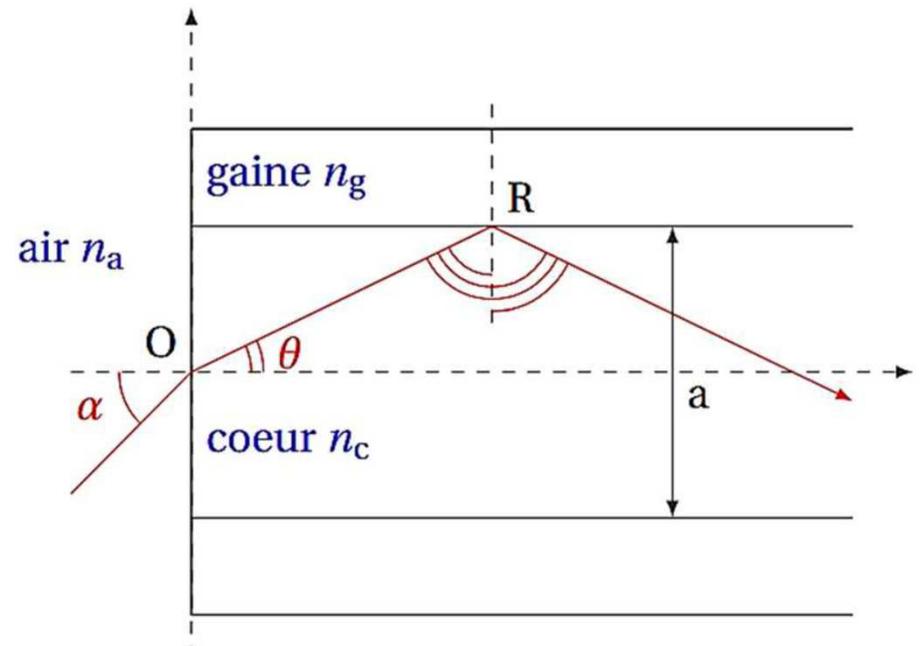
1. Quelle condition doit vérifier l'angle d'incidence i à la surface de séparation cœur-gaine pour qu'un rayon lumineux situé dans le plan XOY se propage en restant confiné dans le cœur ?

On note i_{lim} l'angle d'incidence limite et $\theta_{\text{lim}} = \frac{\pi}{2} - i_{\text{lim}}$.

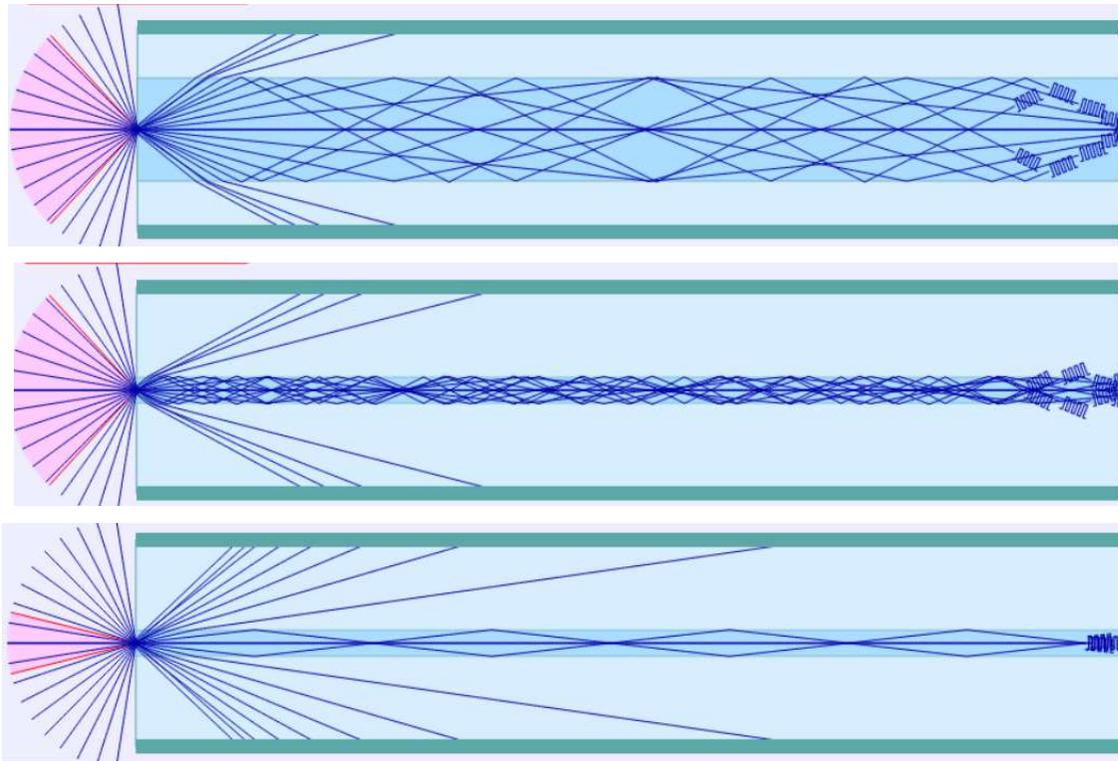
2. Montrer que la condition précédente est vérifiée si l'angle d'incidence sur la face d'entrée de la fibre est inférieur à une valeur limite α_{lim} .
3. Déterminer la valeur de α_{lim} dans le cas d'une fibre optique pour laquelle $n_c = 1,456$, $n_g = 1,410$.

Bonus : On appelle ouverture numérique $\text{ON} = n_a \cdot \sin(\alpha_{\text{lim}})$.

4. Montrer que $\text{ON} = \sqrt{n_c^2 - n_g^2}$



Dispersion intermodale : limitation du débit



Définition : Dispersion intermodale

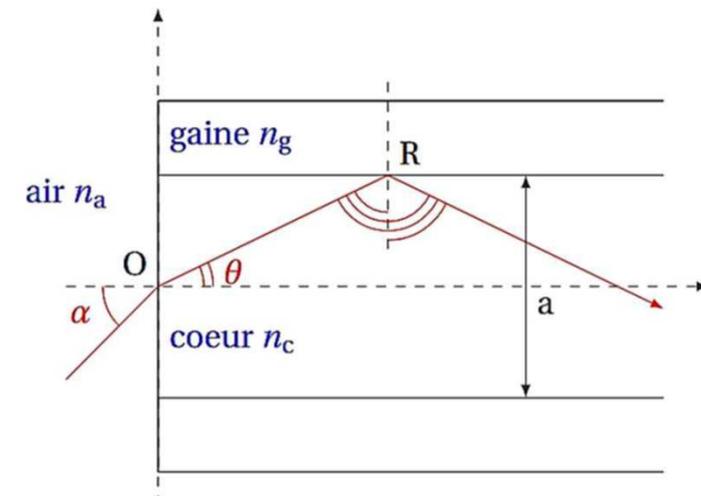
Les chemins suivis par les différents rayons lumineux n'ont pas la même longueur, et leurs **temps de propagation sont donc différents**, cette différence est appelée la **dispersion intermodale**. Elle dépend de la longueur de la fibre.

Cela pose un problème pour le débit des informations transmises, car une information ne doit pas se mélanger avec la précédente ou la suivante !

Savoir-faire 7 – Etablir l'expression de la dispersion intermodale d'une fibre à saut d'indice

On considère maintenant une fibre optique ($n_c = 1,456$, $n_g = 1,410$) de longueur L . Le rayon entre dans la fibre avec un angle d'incidence α variable compris entre 0 et α_{lim} .

5. Quel est le rayon qui traverse le plus rapidement la fibre ? Exprimer, en fonction de L , c et n_c , la durée de parcours Δt_1 de ce rayon.
6. Quel est le rayon qui met le plus de temps à traverser la fibre ? Exprimer, en fonction de L , c , n_g et n_c , la durée de parcours Δt_2 de ce rayon.
7. En déduire l'expression de l'intervalle de temps $\delta t = \Delta t_2 - \Delta t_1$ en fonction de L , c , n_g et n_c . Calculer la valeur de δt pour $L = 100$ km.
8. Quelle est la fréquence maximale d'un signal composé d'impulsions brèves utilisé pour envoyer des informations dans cette fibre ? Il faut que chaque impulsion soit entièrement transmise avant la réception de l'impulsion suivante.



Bonus

Parce que la fibre n'est pas vraiment un MLTHI ...

Choix de la longueur d'onde

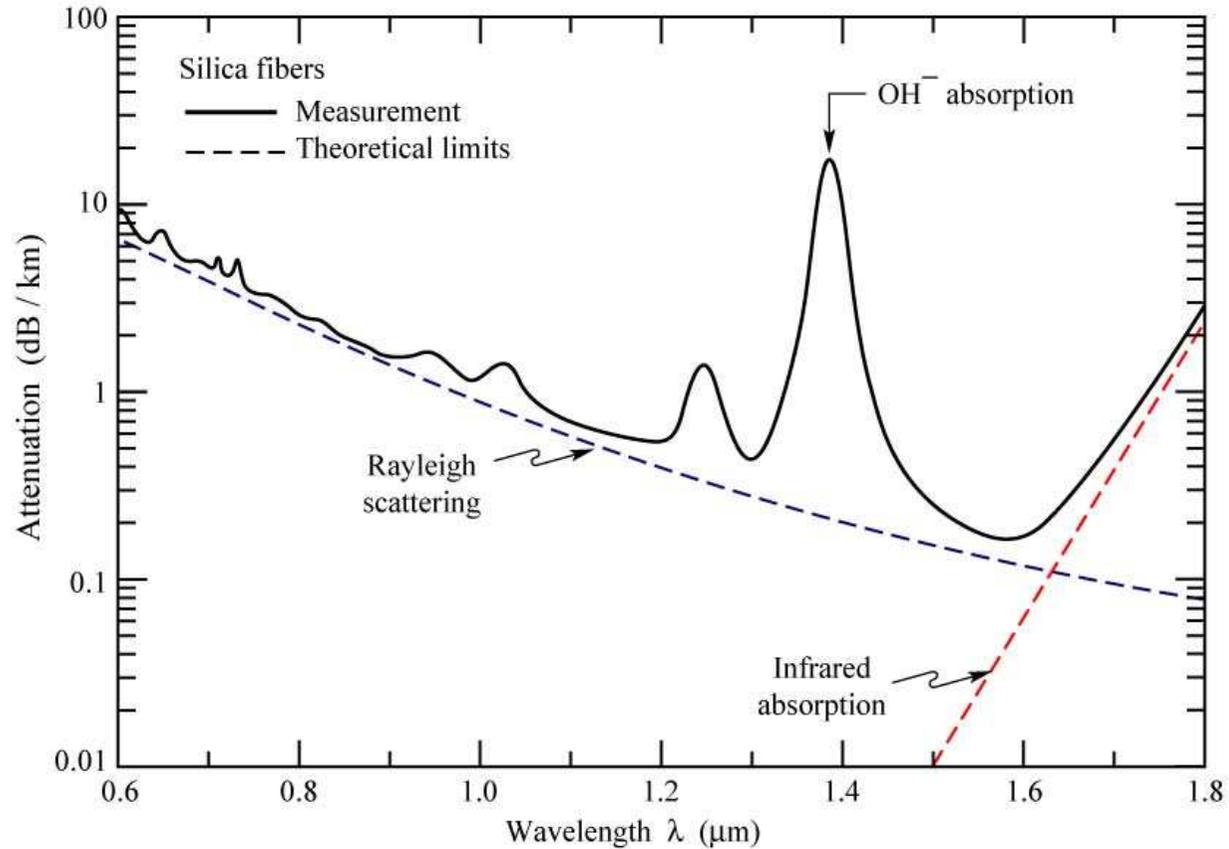


Fig. 22.2. Measured attenuation in silica fibers (solid line) and theoretical limits (dashed lines) given by Rayleigh scattering in the short-wavelength region, and by molecular vibrations (infrared absorption) in the infrared spectral region.

La fibre à gradient d'indice

