

L'objectif de l'optique géométrique est d'étudier la trajectoire des rayons lumineux au sein des dispositifs optiques. Après avoir introduit et précisé le concept de rayon lumineux, nous étudierons deux dispositifs optiques modèles : le miroir plan et la lentille. Ceci nous permettra de comprendre :

- ▷ la fibre optique à saut d'indice ;
- ▷ le fonctionnement de l'œil ;
- ▷ le fonctionnement d'un appareil photo.

1 Lumière et sources lumineuses

1.1 Ondes électromagnétiques et lumière visible

Les ondes électromagnétiques se propagent par une modification locale du champ électromagnétique $(\vec{E}, \vec{B})$. Elles se propagent dans le vide à la vitesse :

$$c = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

On retiendra l'ordre de grandeur :

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

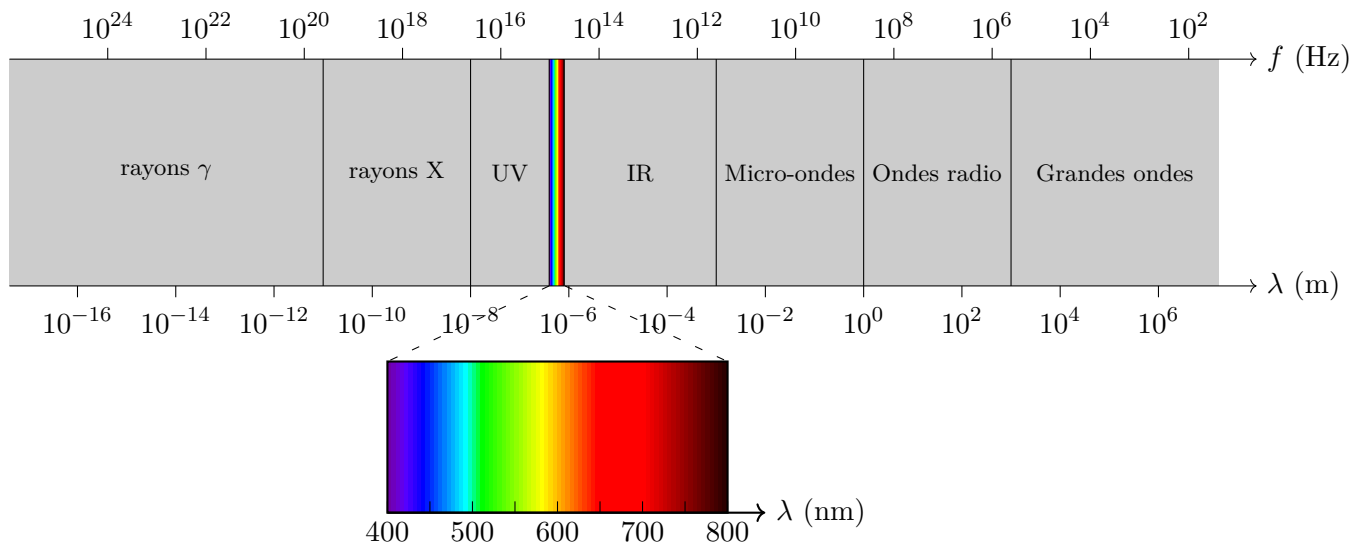
Elles se propagent également dans certains milieux transparents (à certaines fréquences), par exemple dans l'eau à environ $2,25 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et dans les verres à des vitesses de l'ordre de $2 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (la valeur exacte dépendant du type de verre).

Une onde électromagnétique sinusoïdale présente à la fois une périodicité spatiale et une périodicité temporelle. La période temporelle T et la période spatiale, nommée longueur d'onde et notée λ sont reliées par la relation

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

v désigne la célérité de l'onde dans le milieu et f sa fréquence.

Les rayonnements électromagnétiques observés couvrent une gamme de fréquence très étendue, sur plus de 20 ordres de grandeurs.



En optique, on se limite souvent à l'étude des ondes électromagnétiques visibles, bien que ce que l'on va étudier au cours de ces chapitres ne s'y limite pas forcément.

Définition. La lumière visible (on dit parfois simplement lumière) est une onde électromagnétique dont la longueur d'onde dans le vide est comprise entre 400 nm (violet) et 800 nm (rouge). Cela correspond à des fréquences comprises entre 4×10^{14} Hz (rouge) et 8×10^{14} Hz (violet).

1.2 Nature corpusculaire de la lumière

1.2.1 Le photon

La théorie ondulatoire de la lumière s'est imposée au XIX^e siècle à la suite des travaux de Maxwell et de Fresnel, et des expériences de Young.

En 1900, Max Planck, pour expliquer le spectre des corps chauffés ; puis Einstein, en 1905, pour expliquer l'effet photoélectrique, font émerger l'hypothèse que la lumière est composée de petits grains de lumière : les photons. Le plus petit paquet d'énergie échangé avec une radiation de fréquence ν vaut $\Delta E = h\nu$ où h est la constante de Planck.

Ils recevront tout deux pour cela le prix Nobel de physique (Planck en 1918 et Einstein en 1921).

Définition. La lumière correspond au déplacement de particules appelées **photons**.

- Ils sont sans masse : $m_{\text{photon}} = 0$.
- Ils se déplacent toujours à la vitesse de la lumière (c dans le vide et c/n dans les milieux).
- Ils transportent une énergie :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

La constante de proportionnalité h est appelée constante de Planck et est l'une des constantes fondamentales de la physique : $h = 6,62607015 \times 10^{-34}$ J · s.

Application

Calculer l'énergie transportée par un photon bleu. Par un photon rouge.

On fait l'application numérique avec un photon de longueur d'onde $\lambda = 400$ nm : on trouve $E = 4,97 \times 10^{-19}$ J et pour un photon rouge de longueur d'onde $\lambda = 650$ nm : on trouve $E = 3,06 \times 10^{-19}$ J.

Les ordres de grandeur des énergies des photons en Joule sont très faibles. Pour manipuler ces énergies plus facilement, on définit une nouvelle unité.

Définition. L'électronvolt (eV) est une unité d'énergie définie par

$$1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

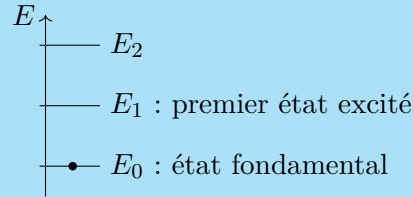
C'est l'énergie cinétique que gagne un électron (ou un proton) lorsqu'il est accéléré par une tension de 1 V.

Application

L'énergie du photon bleu (longueur d'onde $\lambda = 400$ nm) est $E = 3,1$ eV et celle du photon rouge (longueur d'onde $\lambda = 650$ nm) est $E = 1,9$ eV.

1.2.2 Transitions atomiques

L'énergie d'un électron d'un atome ne peut prendre que des valeurs précises : elle est **quantifiée**. Ces valeurs sont nommées **niveaux d'énergie** : le premier est l'état **fondamental** et les niveaux plus élevés sont les états **excités**.

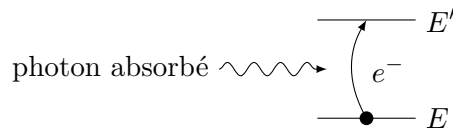


Les modes d'échanges d'énergie : les échanges entre la lumière et la matière sont de trois types et sont nommés **transitions atomiques**.

- **L'absorption :** un photon incident d'énergie $h\nu$ arrive sur un atome dont un électron est sur le niveau d'énergie E . Seulement s'il existe un autre niveau d'énergie E' tel que

$$\Delta E = E' - E = h\nu$$

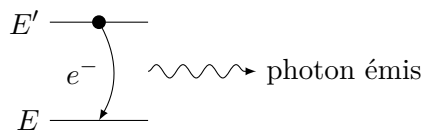
le photon peut être **absorbé** par l'atome et l'électron passe alors au niveau d'énergie excité E' .



Seules certaines longueurs d'ondes peuvent être absorbées par la matière : on les retrouve sur les **spectres d'absorption**.

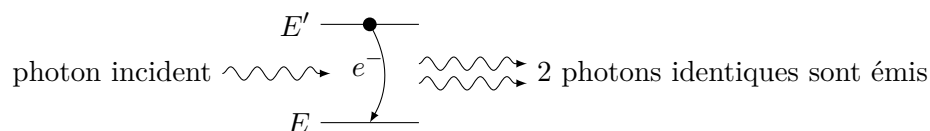
- **L'émission spontanée :** soit un électron sur un niveau d'énergie excité E' et un état d'énergie inférieure E . Spontanément, l'atome peut se désexciter et l'électron passe de l'état d'énergie E' à l'état E . Un photon est émis de fréquence ν donnée par

$$\Delta E = E' - E = h\nu$$



Les longueurs d'ondes émises par un atome sont son **spectre d'émission** qui est la signature de l'atome.

- **L'émission stimulée :** soit un électron sur un niveau d'énergie excité E' et un état d'énergie inférieure E . Un photon incident d'énergie $h\nu = E' - E$ arrive. De façon stimulée, deux photons identiques au photon incident sont émis et l'électron descend d'un niveau d'énergie.



Ce phénomène est la base de la lumière laser.

1.3 Sources de lumières

En optique, on distingue deux types de sources lumineuses :

- ▷ les sources primaires ;
- ▷ les sources secondaires.

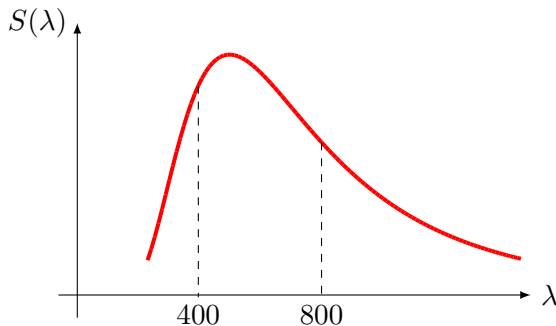
1.3.1 Les sources primaires

Définition. Les sources primaires émettent elle-même la lumière : il s'agit du Soleil, des ampoules, des lasers, etc.

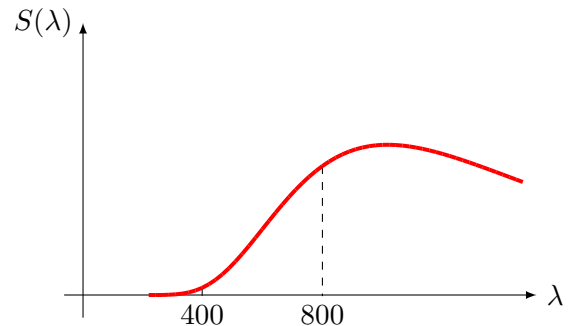
Le processus d'émission peut reposer sur différents processus :

- ▷ les **lampes thermiques** émettent de la lumière à cause de leur température élevée. En effet, tout corps chauffé rayonne des ondes électromagnétiques, à une longueur d'onde d'autant plus petite que leur température est grande. Par exemple :
 - le Soleil à 5700 K rayonne dans le visible, autour de $\lambda = 550 \text{ nm}$;
 - le filament d'une lampe halogène à 3000 K rayonne autour de $\lambda = 1 \text{ }\mu\text{m}$;
 - le corps humain à 350 K rayonne dans l'infrarouge, autour de $\lambda = 10 \text{ }\mu\text{m}$.

Le spectre est la décomposition de la lumière suivant les différentes longueurs d'onde (ou fréquences) qui la composent. Le spectre lumineux émis par les lampes thermiques est continu.

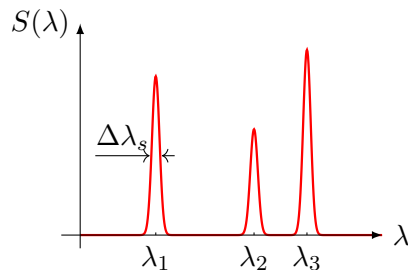


Allure du spectre du Soleil



Allure du spectre d'une lampe halogène

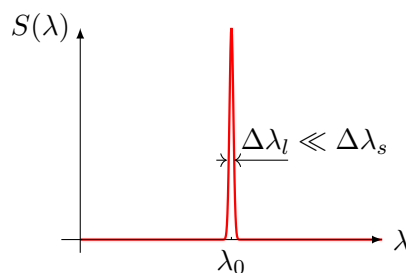
- ▷ les **lampes spectrales** émettent de la lumière à cause de l'excitation de certains atomes. Le spectre émis est discret ; seules certaines longueurs d'onde sont émises et dépendent de la lampe considérée.



Allure du spectre d'une lampe spectrale

Dans le cas des tubes néons et des LED, on utilise un revêtement fluorescent pour élargir les pics et avoir un rendu de couleur meilleur qu'une lampe spectrale. Néanmoins, le principe de ces deux sources de lumières est celui d'une lampe spectrale.

- ▷ les **lasers** émettent une lumière très directive et quasiment monochromatique. Leur invention est beaucoup plus récente (le laser a 65 ans).



Allure du spectre d'un laser

1.3.2 Les sources secondaires

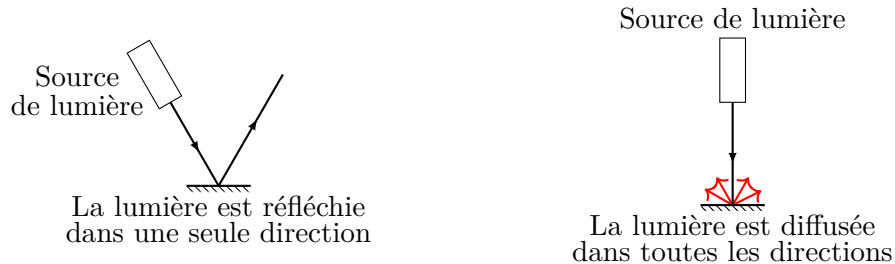
Nous arrivons à percevoir de la lumière venant des objets qui nous entourent : ce sont des sources secondaires.

Définition. Les sources secondaires ne produisent pas de lumière et ne font que la retransmettre : il s'agit par exemple de la Lune, les murs, les objets, les miroirs.

Une source secondaire peut :

- ▷ réfléchir la lumière, comme les miroirs ;
- ▷ la diffuser dans toutes les directions comme la plupart des objets.

Il se peut également qu'une partie de la lumière soit diffusée, l'autre réfléchi.



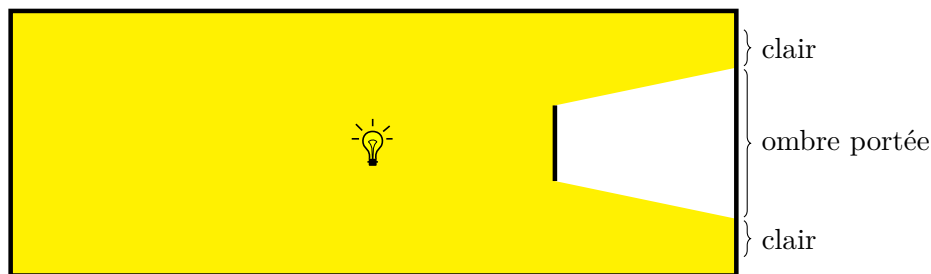
Couleur d'un objet : Un objet donné absorbe certaines longueurs d'onde et en diffuse d'autres. Les longueurs diffusées (et non absorbées) donnent la couleur à un objet.

2 Le rayon lumineux

2.1 Introduction

La lumière est une onde lumineuse. Mais nous avons vu que ce caractère ondulatoire ne se manifeste que sur de petites échelles avec la diffraction par exemple, ou dans des conditions expérimentales particulières avec les interférences.

Imaginons l'expérience suivante : dans une pièce sombre, on allume une lampe dans la direction d'un objet. Sur le mur est projetée l'**ombre portée** de l'objet. Tout se passe comme si la lumière se propageait en ligne droite et que seuls certains rayons étaient bloqués par l'objet.



Définition. Un rayon lumineux matérialise là où passe la lumière. On le représente avec un trait et une flèche.



Un laser permet de visualiser expérimentalement la trajectoire d'un rayon lumineux.

⚠ Attention

On ne peut pas isoler un rayon lumineux : c'est un outil théorique.

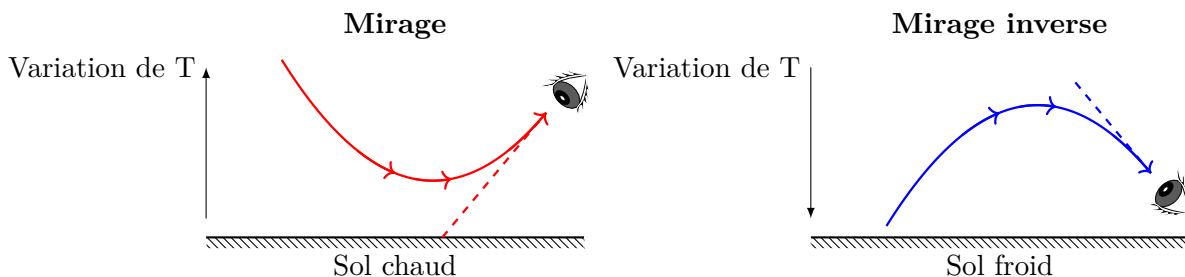
2.2 Propriétés d'un rayon lumineux

- ▷ Dans un milieu **homogène**, les rayons se propagent en ligne droite.
- ▷ Les rayons lumineux sont indépendants : ils se croisent sans interagir.
- ▷ **Principe de retour inverse** : le chemin suivi par la lumière ne dépend pas du sens de propagation :



2.3 Limites du modèle

- ▷ La **diffraction** : au passage d'une petite ouverture, la lumière est diffractée et ne se propage pas en ligne droite. On retient en général $a > 1000\lambda$ pour la taille des obstacles permettant de se placer dans le cadre de l'optique géométrique.
- ▷ Les phénomènes ondulatoires de façon générale : les rayons lumineux ne permettent pas de prédire l'apparition d'interférences.
- ▷ La **polarisation de la lumière**. La lumière est une oscillation des champs électrique $\vec{E}$ et magnétique $\vec{B}$ et est donc vectorielle. Cette caractéristique est importante dans de nombreux phénomènes : la lumière provenant du ciel bleu est polarisée, certains cristaux affectent la polarisation de la lumière, les écrans à cristaux liquides et le cinéma 3D l'utilisent.
- ▷ l'**inhomogénéité du milieu**. Lorsque le milieu n'est pas homogène, la lumière ne se propage pas en ligne droite : ceci est à l'origine du phénomène de mirage. Dans le cas d'un mirage chaud, l'œil croit regarder le sol mais la lumière lui vient du ciel.



3 Indice optique et lois de Snell-Descartes

3.1 Définition

Dans le vide, la célérité des ondes est

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

Dans les milieux matériels comme l'eau ou le verre, la vitesse de la lumière est plus faible.

Définition. L'indice optique d'un milieu est le rapport entre la célérité de la lumière dans le vide c et la célérité de la lumière dans le milieu v :

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

Il est sans dimension.

La vitesse de la lumière est plus faible dans les milieux matériels que dans le vide. Donc :

L'indice optique est **toujours** supérieur à 1.

Quelques valeurs numériques.

Vide	Air	Eau	Verre	Diamant
1	$1,00029 \approx 1$	1,33	1,5 à 1,7	2,4

Vocabulaire. Soient deux milieux d'indices n_1 et n_2 . Si $n_2 < n_1$, on dit que le milieu 2 est plus réfringent que le milieu 1.

Remarque. La vitesse de la lumière dépend en réalité de la longueur d'onde, donc l'indice optique n aussi : le milieu est **dispersif**. On peut mettre en évidence ce phénomène avec un prisme : les différentes longueurs d'onde sont déviées avec des angles différents : le spectre de la lumière blanche apparaît.

Conséquence sur les longueurs d'onde

Lors du changement de milieu, la fréquence reste constante.

$$f = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{v}{\lambda}$$
$$\lambda = \frac{v}{c} \lambda_0 = \frac{\lambda_0}{n}$$

Notons λ_0 la longueur d'onde d'une onde électromagnétique dans le vide. Sa longueur d'onde dans un milieu d'indice n est :

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

Remarque.

1. C'est la fréquence qui donne sa couleur à une onde.
2. On donne usuellement les longueurs d'onde dans le vide (400 nm / 800 nm par exemple).

3.2 Réfraction et réflexion d'une onde lumineuse

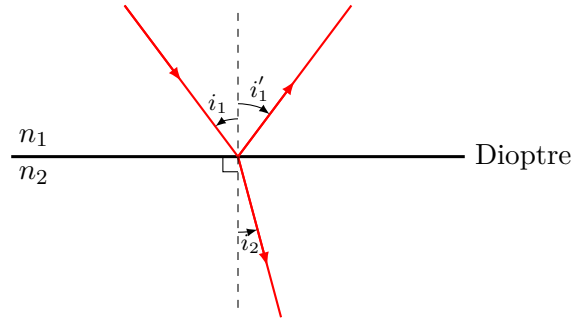
Nous observons qu'au passage de l'interface air/plexiglas, le rayon incident se partage entre un rayon réfléchi et un rayon réfracté.

Définition. On appelle **dioptre** la surface de séparation entre deux milieux d'indices différents.

On considère sur le schéma ci-dessous des angles **orientés** : ce sont des grandeurs algébriques :

- l'angle est positif si le sens de la flèche est le sens trigonométrique ;
- il est négatif le sens de la flèche est le sens horaire.

Lois de Snell-Descartes. Sur le schéma ci-dessous :



1. Les rayons réfléchis et réfractés appartiennent au plan d'incidence (défini par la normale au plan d'incidence et le rayon incident).
2. Les angles d'incidence et de réflexion sont opposés :

$$i_1' = -i_1$$

3. L'angle de réfraction i_2 et l'angle d'incidence i_1 sont reliés par la relation :

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

Application

Calculer l'indice du verre à l'aide de l'expérience. On mesure $i_1 = 60^\circ$ et $i_2 = 35^\circ$ donc :

$$n_2 = \frac{n_1 \sin(i_1)}{\sin(i_2)} = 1,51$$

3.3 Angles limites de réfraction

3.3.1 Cas $n_1 < n_2$

Lors du passage de l'air au plexiglas, on observe que l'angle de réfraction ne dépasse jamais 42° .

Explication : On part de :

$$\sin(i_1) \leq 1$$

Donc :

$$n_1 \sin(i_1) \leq n_1$$

$$n_2 \sin(i_2) \leq n_1$$

Ainsi :

$$\sin(i_2) \leq \frac{n_1}{n_2}$$

Comme $n_1/n_2 < 1$:

$$i_2 \leq \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\right)$$

Dans le cas d'une réfraction dans un milieu plus réfringent, on définit l'angle de réfraction limite comme la valeur maximale qu'il peut prendre (il correspond à $i_1 = 90^\circ$). Il vaut :

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

Pour l'interface air/verre étudiée, $n_1 \approx 1$ et $n_2 \approx 1,5$ donc $i_{2,\text{lim}} = 41,8^\circ$.

3.4 Cas $n_2 < n_1$

Lors du passage du plexiglas à l'air, au-delà d'un certain angle d'incidence, il n'y a plus de rayon réfracté et le rayon est réfléchi en totalité.

Explication : Si le rayon réfracté existe, alors on peut écrire l'inéquation suivante sur i_2 :

$$\sin(i_2) \leq 1$$

Donc :

$$n_2 \sin(i_2) \leq n_2$$

D'après la loi de Descartes :

$$n_1 \sin(i_1) \leq n_2$$

Ainsi :

$$\sin(i_1) \leq \frac{n_2}{n_1}$$

$n_2/n_1 < 1$, on obtient :

$$i_1 \leq \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

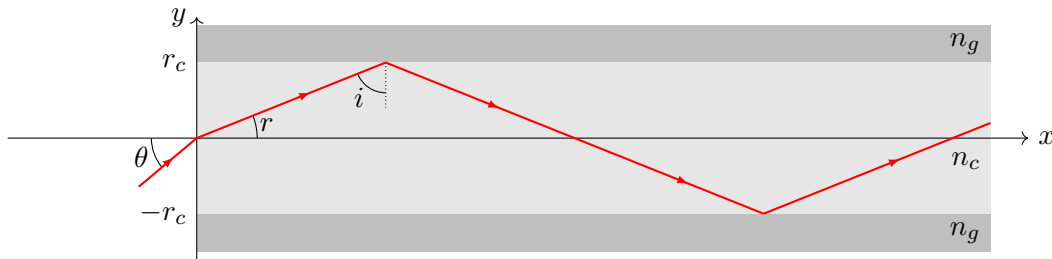
Par contraposée, si i_1 dépasse la valeur limite

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

la troisième loi de Descartes n'a plus de solutions : il y a réflexion totale de l'onde.

4 Application : la fibre optique à saut d'indice

Une fibre optique à saut d'indice est constituée d'un cœur cylindrique transparent d'indice n_c et de rayon r_c , entouré d'une gaine transparente d'indice $n_g < n_c$.



Principe : Un rayon lumineux monochromatique se propageant dans l'air, situé dans le plan (xOy) , pénètre dans le cœur de la fibre en O avec un angle d'incidence θ . Il subit une réfraction de l'air d'indice n_a vers le cœur d'indice n_c . S'il arrive assez rasant au niveau de l'interface cœur/gaine, comme $n_g < n_c$, il peut subir une réflexion totale, et ainsi se propager le long de la fibre sans en sortir.

Angle d'acceptance : Il s'agit de l'angle θ maximal permettant ce fonctionnement. Pour obtenir son expression, repérons les angles θ et r par rapport à la normale au dioptre. D'après la loi de Descartes :

$$n_a \sin \theta = n_c \sin r$$

Ensuite, en utilisant la somme des angles dans un triangle rectangle :

$$i + r + \frac{\pi}{2} = \pi \quad \text{donc} \quad i = \frac{\pi}{2} - r$$

Il faut que l'angle d'incidence sur le dioptré cœur-gaine, i , soit supérieur à i_{lim} de sorte à éviter la présence d'un rayon réfracté et avoir réflexion totale. Cet angle vaut, comme on l'a vu :

$$i_{\text{lim}} = \arcsin\left(\frac{n_g}{n_c}\right)$$

La condition pour avoir réflexion totale sur le dioptré cœur/gaine est :

$$\begin{aligned} & i > i_{\text{lim}} \\ \iff & \frac{\pi}{2} - i < \frac{\pi}{2} - i_{\text{lim}} \\ \iff & r < \frac{\pi}{2} - i_{\text{lim}} \\ \iff & n_c \sin r < n_c \sin \left[\frac{\pi}{2} - i_{\text{lim}} \right] \\ \iff & n_a \sin \theta < n_c \cos [i_{\text{lim}}] \end{aligned}$$

D'où :

$$n_a \sin \theta < n_c \cos \left[\arcsin \left(\frac{n_g}{n_c} \right) \right]$$

Pour simplifier cette relation, on utilise la relation $\cos x = \sqrt{1 - \sin^2 x}$. Ainsi :

$$\begin{aligned} n_a \sin \theta_{\text{lim}} &= n_c \cos \left[\arcsin \left(\frac{n_g}{n_c} \right) \right] \\ &= n_c \sqrt{1 - \sin^2 \left[\arcsin \left(\frac{n_g}{n_c} \right) \right]} \\ &= n_c \sqrt{1 - \left(\frac{n_g}{n_c} \right)^2} \\ &= \sqrt{n_c^2 - n_g^2} \end{aligned}$$

Dispersion intermodale : On note L la longueur de la fibre optique. Le rayon entre dans la fibre avec un angle d'incidence θ variable compris entre 0 et θ_{lim} .

Le rayon le plus rapide est celui qui va en ligne droite. Il parcourt la distance L à la vitesse c/n_c soit :

$$T_1 = \frac{n_c L}{c}$$

Le rayon le plus lent est celui qui arrive avec l'incidence θ_L . Il parcourt l'hypothénuse du triangle, soit $L/\sin i_{\text{lim}}$ au lieu de parcourir la distance L . Ainsi :

$$T_2 = \frac{n_c L}{c \sin i_{\text{lim}}}$$

Or $\sin i_{\text{lim}} = n_g/n_c$ d'où :

$$T_2 = \frac{n_c^2 L}{c n_g}$$

L'écart de temps à la réception $\delta T = T_1 - T_2$ est donc :

$$\delta T = \frac{n_c L}{c} \left(1 - \frac{n_c}{n_g} \right)$$

Les impulsions lumineuses en entrée vont être étalées de la durée δT . En les supposant très courtes, il faudra quand même δT pour pouvoir les séparer donc le débit sera inférieur à $1/\delta T$. Pour $L = 100$ km, $n_c = 1,500$ et $n_g = 1,498$, on obtient $\delta T \approx 1 \mu s$ soit un débit maximal de 1 Mb/seconde, ce qui est bien inférieur à ce que proposent les fournisseurs d'accès internet. En pratique, on n'utilise pas la fibre optique à saut d'indice pour cette raison.