

Chapitre 01 : Réflexion et réfraction des rayons lumineux

Plan du cours

I. Sources de lumière	2
I. 1 - Source primaire, source secondaire	2
I. 2 - Spectre de la lumière	2
I. 3 - Exemples de sources lumineuses	3
II. Réflexion et réfraction des rayons lumineux	5
II. 1 - Cadre de l'optique géométrique	5
II. 2 - Qu'est-ce qu'un rayon lumineux ?	5
II. 3 - Principe de Fermat (hors-programme MP)	6
II. 4 - Lois de Snell-Descartes de la réflexion et de la réfraction (rappels de 2nde)	6
II. 5 - Précisions sur la réfraction, notion de réflexion totale	8
III. Étude de la fibre optique à saut d'indice	10
III. 1 - Principe de fonctionnement	10
III. 2 - Cône d'acceptance et ouverture numérique	10

Introduction

▷ L'optique est la branche de la physique qui correspond à l'étude de la lumière, ainsi qu'à la formation et à la vision des images. La nature de la lumière a suscité de nombreuses interrogations depuis l'Antiquité et a même fait débat, la théorie corpusculaire (hypothèse des "grains de lumière") défendue par NEWTON s'opposant à la théorie ondulatoire proposée par HUYGENS au XVII^e siècle.

Quelques repères historiques :

- III^e siècle av. J.-C. : EUCLIDE suppose que l'œil est une source de lumière.
- II^e siècle ap. J.-C. : PTOLÉMÉE rédige l'un des premiers traités d'optique, dans lequel il rend compte des phénomènes de réfraction et de réflexion.
- XI^e siècle : ALHAZEN (philosophe et physicien arabe) introduit les notions d'objet et d'image en optique dans son *Traité d'Optique* (1021) ; il propose que la lumière est émise par une source extérieure et reçue par l'œil.
- XVI^e et XVII^e siècles : construction des premiers instruments d'optique (lunette de GALILÉE, lunette de KEPLER, télescope - avec des miroirs - de NEWTON) ; formulation des lois de SNELL-DESCARTES ;
- XVIII^e et XIX^e siècles : développement d'une théorie ondulatoire de la lumière sur la base d'observations expérimentales (diffraction, interférences) par YOUNG, FRESNEL, ou encore MALUS ; équations de MAXWELL (1831-1879) régissant l'électromagnétisme.
- XX^e siècle : développement de la physique quantique et théorie de la dualité onde-corpuscule grâce aux travaux d'EINSTEIN, PLANCK, DE BROGLIE, etc.

I. Sources de lumière

I. 1 - Source primaire, source secondaire

► Une source lumineuse est un objet envoyant de la lumière. On distingue les **sources lumineuses primaires**, qui émettent eux-mêmes la lumière (Soleil, ampoule, laser, etc.), et les **sources lumineuses secondaires**, qui ne font que renvoyer la lumière qu'ils reçoivent (Lune, miroirs, et plus largement tous les objets).



Remarque

Une source secondaire peut **réfléchir** la lumière dans une direction bien précise, ou la **diffuser** dans toutes les directions, voir figure 1. Qualitativement, la diffusion de la lumière s'explique par la présence de rugosités microscopiques, qui font qu'un rayon lumineux est réfléchi dans une direction plus ou moins aléatoire par la surface du matériau.

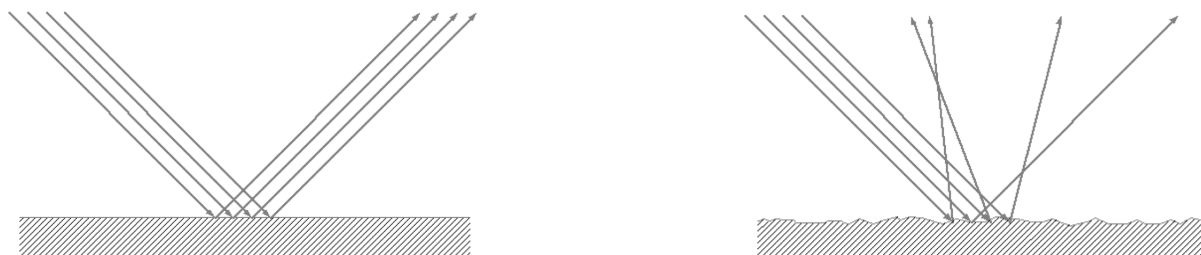


FIGURE 1 – Réflexion (à gauche) et diffusion (à droite)

I. 2 - Spectre de la lumière

► La lumière fait partie d'un ensemble plus vaste d'ondes appelées **ondes électromagnétiques (OEM)**. Les diverses valeurs de l'énergie de rayonnement, dont la fréquence varie théoriquement entre zéro et l'infini constituent le **spectre électromagnétique**. Une OEM sinusoïdale, c'est-à-dire dont le spectre ne contient qu'une seule fréquence est appelée **onde monochromatique**.

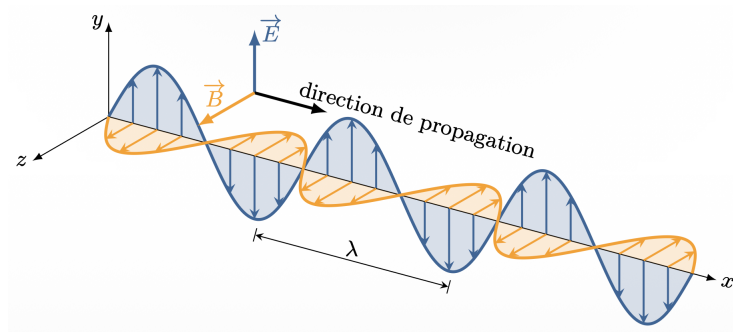


FIGURE 2 – Structure d'une OEM

On remarque qu'une OEM est composée d'un champ électrique $\vec{E}$ et d'un champ magnétique $\vec{B}$ tous deux orthogonaux entre eux et orthogonaux à la direction de propagation (hors-programme MP). Une onde sinusoïdale est caractérisée par une **double périodicité** :

- périodicité spatiale : l'onde se reproduit identique à elle même dans l'espace après avoir parcouru une distance λ appelée **longueur d'onde**. ❤
- périodicité temporelle : l'onde se reproduit identique à elle même entre un instant t et un instant $t + T$ où T désigne la **période temporelle**. ❤



Propriété n°1 : Lien entre longueur d'onde et période temporelle

La longueur d'onde λ correspond à la distance sur laquelle l'onde se propage à la célérité c pendant une durée égale à la période temporelle T . Ainsi $\lambda = c \times T \Leftrightarrow \lambda = \frac{c}{f}$.

- $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ désigne la célérité de l'OEM dans le vide ♥ ;
- λ désigne la longueur d'onde de l'OEM dans le vide, en m ;
- f désigne la fréquence de l'OEM dans le vide, en Hertz (Hz).

♥ **Propriété n°2 : composition de la lumière**
 La lumière est composée d'une infinité d'ondes monochromatiques de fréquence bien définie.

Une source primaire est donc caractérisée par un **spectre d'émission**. On représente ci-dessous le spectre des ondes électromagnétiques. Les longueurs d'onde varient de 10^2 m à 10^{-14} m : on a donc classé ces différentes ondes en divers domaines délimités par les longueurs d'onde, qui ont chacun des applications différentes dans la vie courante.

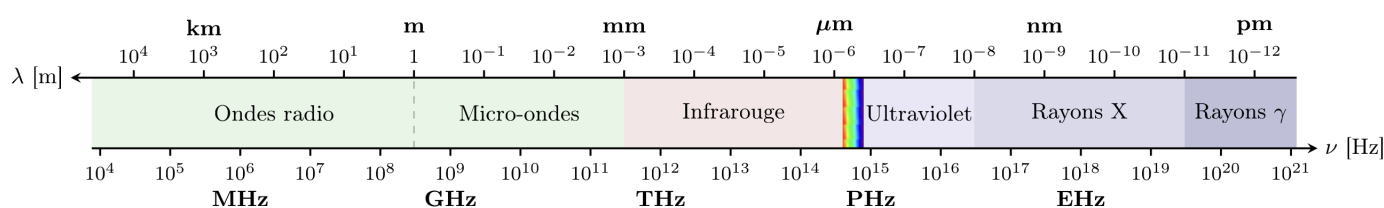


FIGURE 3 – Spectre des OEM

📎 **Remarque**
 La fréquence est ici notée ν (prononcer "nu") au lieu de f . C'est une autre notation courante que vous aurez souvent l'occasion de rencontrer.

▷ Nous allons à présent discuter de la nature des spectres d'émission de différentes sources lumineuses.

I. 3 - Exemples de sources lumineuses

I. 3. a) Sources thermiques

♥ **Propriété n°3 : spectre d'une source chaude ou d'une source de lumière blanche**
 Une source de lumière blanche possède un spectre continu qui contient toutes les longueurs d'ondes (visibles et autres).

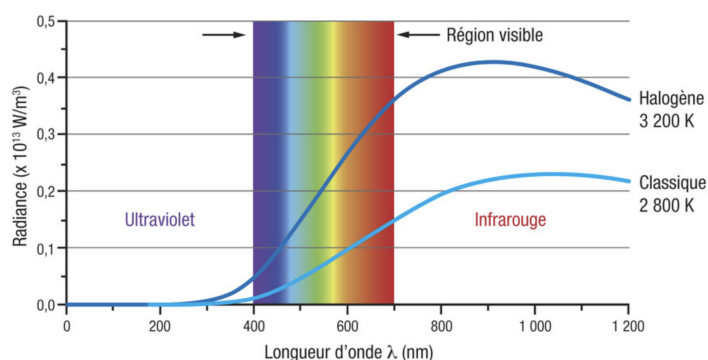


FIGURE 4 – Spectre de lampes à incandescence

Dans le Soleil ou les lampes à filament, la lumière est émise par un corps chauffé à haute température (agitation thermique). Dans une lampe domestique, on a émission de lumière grâce à un filament de tungstène porté à 2800 K environ. La température du Soleil est d'environ 6000 K, avec un maximum de longueur d'onde dans le visible.

**Attention !**

Une source de lumière blanche n'apparaît pas forcément blanche à l'œil nu : c'est une **synthèse additive** de toutes les couleurs pondérées avec leur intensité.

I. 3. b) Sources spectrales**Propriété n°4 : spectre d'une source spectrale, spectre de raies**

Une lampe spectrale possède un spectre composé de pics fins appelés raies spectrales, caractéristiques de l'espèce chimique qu'elle contient.

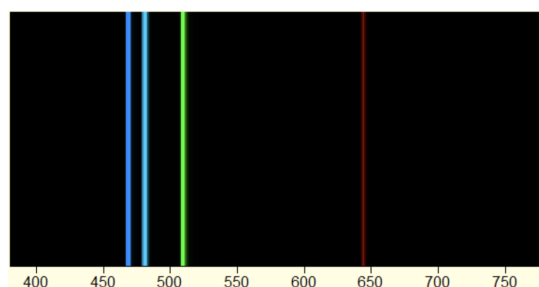


FIGURE 5 – Spectre de raies d'une lampe à vapeur de cadmium

- Une lampe spectrale contient une ampoule avec une espèce chimique à l'état gazeux.
- En subissant une décharge électrique, les électrons des atomes de gaz sont alors dans un état excité. La désexcitation se fait par émission spontanée de photons.
- L'énergie et donc la fréquence de ces photons est reliée à la différence d'énergie entre niveaux des atomes du gaz.
- La couleur d'une lampe spectrale est une couleur composée : tout se passe comme s'il y avait une synthèse additive des couleurs des différentes raies.
- L'étude du spectre permet de recenser les éléments chimiques présents dans la lampe.

**Remarque**

Le spectre est en réalité continu car le spectre purement thermique est toujours présent, mais il est très fortement piqué autour des longueurs d'ondes de l'émission. Ces derniers pics sont plus ou moins larges selon la source émettrice.

I. 3. c) Cas du LASER

▷ Le LASER (*Light Amplified System by Stimulated Emission of Radiation*) a été inventé dans les années 1960 et offre aujourd'hui de nombreuses applications en industrie et en médecine. Le LASER fonctionne sur le même principe que pour les lampes spectrales à la différence près que le dispositif fait en sorte de **désexciter un grand nombre d'atomes avec un processus appelé "émission stimulée"**. Le rayonnement émis par les atomes de la source LASER est confiné entre deux miroirs. Dans une source LASER, l'onde effectue alors des allers-retours entre les deux miroirs : le spectre est discontinu et ne contient qu'une seule fréquence.

**Propriété n°5 : spectre du LASER**

Un faisceau LASER présente une unique raie spectrale beaucoup plus fine qu'une raie spectrale : la lumière LASER constitue ainsi la forme la plus proche du modèle de la source lumineuse monochromatique.

Remarque

Les sources LASER sont très directives et sont des sources de faible puissance lumineuse : quelques milliwatts. Le diamètre du faisceau à la sortie du tube est d'environ 1 mm. L'éclairement est de l'ordre de $1\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, donc sensiblement le même que celui reçu sur Terre par le Soleil : dangereux pour l'œil donc.

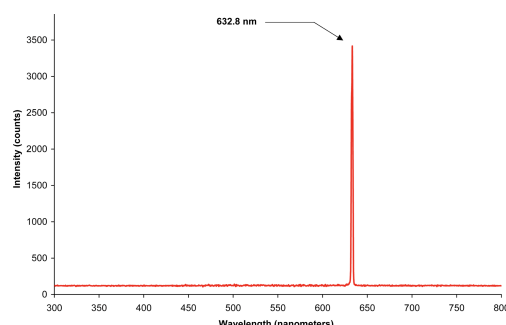


FIGURE 6 – Spectre d'un LASER He-Ne (hélium-néon)

II. Réflexion et réfraction des rayons lumineux

II. 1 - Cadre de l'optique géométrique

▷ L'optique géométrique est un **modèle** résultant d'une approximation de l'optique ondulatoire (vue en MP). Il ne permet pas d'expliquer les phénomènes de diffraction et d'interférences. Cependant, de nombreuses expériences simples d'optique peuvent être expliquées avec ce modèle qui n'est valable que si certaines conditions sont vérifiées.

Propriété n°6 : condition de validité de l'optique géométrique

▷ L'optique géométrique est applicable lorsque les effets ondulatoires peuvent être ignorés : il faut que la taille caractéristique a du milieu de propagation soit très grande devant la longueur d'onde λ de la lumière :

$$a \gg \lambda$$

Dans le cas contraire, un phénomène de diffraction se produit. On peut prendre typiquement un facteur 1000 entre a et λ pour s'assurer que la condition est bien vérifiée.

II. 2 - Qu'est-ce qu'un rayon lumineux ?

Définition n°1 : rayon lumineux

Un rayon lumineux est un pinceau lumineux très fin que l'on isole grâce à un diaphragme. Les rayons lumineux sont des lignes droites selon lesquelles l'onde lumineuse se propage, c'est-à-dire son énergie, se propage.

Remarque

Le modèle du rayon lumineux est valable dans les milieux TLHI, où la lumière se propage en ligne droite.

Définition n°2 : milieu TLHI

▷ Un milieu TLHI est :

- **transparent** si l'absorption d'énergie lumineuse est faible ;
- **linéaire** si les effets sont proportionnels aux causes ;
- **homogène** si les propriétés physiques sont identiques en tout point ;
- **isotrope** si les propriétés sont identiques dans toutes les directions de l'espace.

On retiendra que la lumière se propage **rectilignement** dans un milieu TLHI. ♥

II. 3 - Principe de Fermat (hors-programme MP)



Un peu d'histoire...

Le principe de FERMAT a été formulé vers 1662, postérieurement aux lois de la réfraction de SNELL-DESCARTES, énoncées en 1637. Ces lois étant d'origine purement expérimentales, FERMAT cherchait à leur donner une interprétation géométrique et physique. D'abord formulé comme un postulat, le principe de FERMAT a ensuite été redémontré à partir des lois fondamentales de l'électromagnétisme, les équations de MAXWELL. Voici sa formulation historique :

"Les rayons lumineux se propagent en suivant le chemin qui minimise le temps de parcours par rapport aux chemins voisins."

Nous allons voir dans un instant que les chemins optiques dépendent de l'indice optique du milieu traversé.



Définition n°3 : indice optique

▷ L'indice optique (ou indice de réfraction) n est le rapport de la célérité c_0 de la lumière dans le vide sur la célérité c de la lumière dans le milieu considéré :

$$n = \frac{c_0}{c}$$

RAJOUTER QUE LA FREQUENCE NE DEPEND PAS DU MILIEU OPTIQUE MAIS QUE LA LONGUEUR D'ONDE SI

▷ Voici quelques valeurs d'indice optique utiles à savoir :

Milieu	vide	air	eau	PVC	diamant
Indice optique	1	$1,00029 \simeq 1$	1,33	1,52	2,41



Remarques

- Un indice optique est nécessairement supérieur ou égal à 1.
- L'indice optique est une grandeur qui varie en fonction de la pression, de la température (voir mirages), mais aussi de la fréquence de la lumière : on parle alors de milieu dispersif (voir prisme).



Propriété n°7 : chemin optique (hors-programme MP)

▷ Soit une onde lumineuse se propageant entre un point S et un point M . On note (SM) le chemin optique entre S et M et on a :

$$(SM) = \int_S^M n(s) ds$$

où $n(s)$ désigne l'indice optique à l'abscisse curviligne s .

On retiendra que pour un milieu TLHI, $n = \text{cste}$, et comme les trajets des RL sont en ligne droite, alors :

$$(SM) = n \times SM$$

▷ Nous allons démontrer les lois de SNELL-DESCARTES que vous avez vues en 2nde à l'aide de ce principe.

II. 4 - Lois de Snell-Descartes de la réflexion et de la réfraction (rappels de 2nde)

▷ Les lois de SNELL-DESCARTES sont une formulation mathématique des phénomènes de réflexion et réfraction que nous rencontrons tous les jours dans notre vie quotidienne.



FIGURE 7 – Singe se regardant dans le miroir (réflexion)



FIGURE 8 – Paille dans un verre d'eau (réfraction)

C'est grâce aux phénomènes de réflexion et de réfraction de la lumière que le petit singe arrive à se voir dans le miroir, et que la paille semble "tordue" à l'interface air/eau.

♥ Définition n°4 : dioptré, plan d'incidence, angles d'incidence, de réflexion et de réfraction

- la surface entre les deux milieux TLHI est appelée **dioptré** ;
- la normale au dioptré et le rayon incident forment le **plan d'incidence** ;
- les angles i_1 , r et i_2 sont respectivement appelés les angles d'**incidence**, de **réflexion** et de **réfraction**. Ces angles sont **algébriques** et **orientés par rapport à la normale au dioptré**.

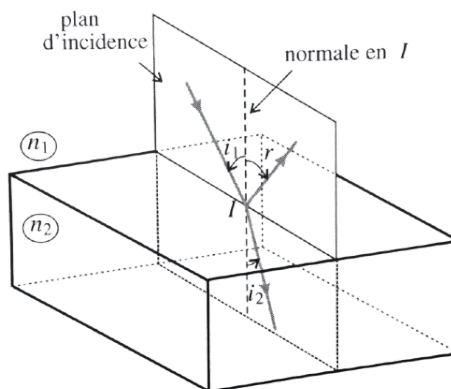


FIGURE 9 – Réflexion et réfraction sur un dioptré

♥ Propriété n°8 : lois de Snell-Descartes

▷ On note n_1 l'indice optique du milieu incident et n_2 l'indice optique de propagation du rayon réfracté.

Les lois de SNELL-DESCARTES énoncent :

- les rayons réfléchi et réfracté sont situés dans le même plan d'incidence ;
- loi de la réflexion : $i_1 = -r$ (ces angles sont égaux en valeur absolue) ;
- loi de la réfraction : $n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$.

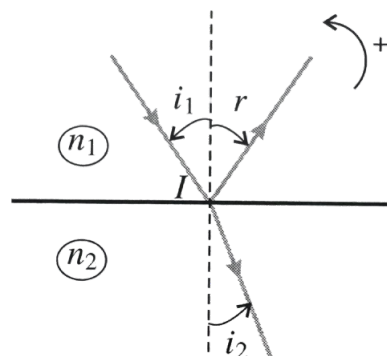


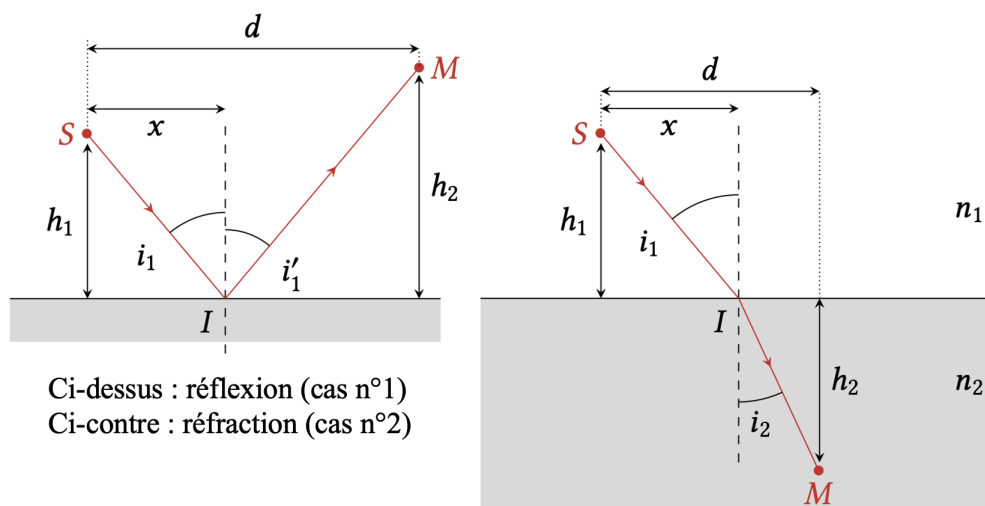
FIGURE 10 – Représentation dans le plan d'incidence

**Remarque**

Vous serez souvent amenés à faire des conversions entre les $^\circ$ et les rad. À retenir : $360 = 2\pi \text{ rad}$. ❤

**Application n°1 : Démonstration des lois de Snell-Descartes à l'aide du principe de Fermat**

Dans les deux cas ci-dessous, on considère un rayon lumineux émis par une source ponctuelle S situé à une distance horizontale x du point d'incidence I .

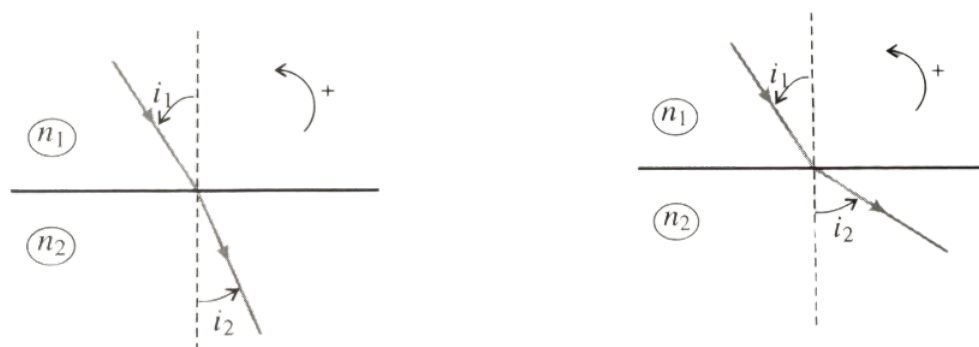


Dans chacun des deux cas, répondre aux questions suivantes :

- Q 1.** Déterminer l'expression du chemin optique $(SM)(x)$ suivi par le rayon lumineux en fonction de x et des données du problème.
- Q 2.** En appliquant le principe de FERMAT, établir une condition portant sur τ permettant de minimiser le chemin optique parcouru. Rappel : pour une fonction $f = \sqrt{g}$, $\forall x \in \mathcal{D}'_f$, $f'(x) = \frac{g'(x)}{2\sqrt{g(x)}}$.
- Q 3.** En déduire la loi de SNELL-DESCARTES correspondante.

II. 5 - Précisions sur la réfraction, notion de réflexion totale

On souhaite étudier l'impact de n_1 et n_2 sur les rayons lumineux incident, réfléchi et réfracté.

**Application n°2 : Quel milieu sera le plus réfringent ?**

Question : Indiquer dans les situations ci-dessus si $n_1 > n_2$ ou si $n_2 > n_1$.

♥ Propriété n°9 : trouver d'un coup d'œil le milieu le plus réfringent

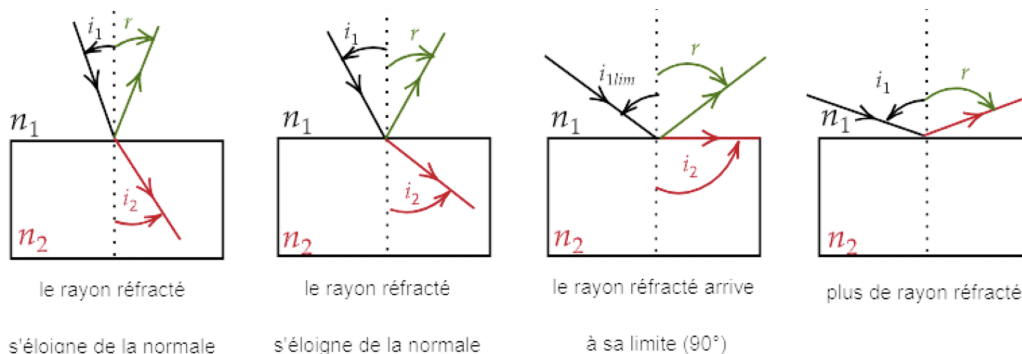
▷ Le rayon lumineux le plus proche de la normale au dioptre se trouve dans le milieu le plus réfringent.

Il arrive que dans certaines situations, le rayon réfracté disparaisse : on parle alors de réflexion totale.

♥ Propriété n°10 : condition de réflexion totale

▷ Pour avoir une réflexion totale d'un milieu n_1 à un milieu n_2 :

- il faut passer d'un milieu plus réfringent à un milieu moins réfringent ($n_1 > n_2$) ;
- pour $i_1 \geq i_{1,\text{lim}} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$, il n'y a pas de réfraction : on aura alors **réflexion totale**.



🌿 Démonstration :

▷ Tant que le rayon réfracté existe, alors il n'y a pas réflexion totale : il faut trouver un angle d'incidence i_1 tel qu'il soit plus grand que l'angle d'incidence limite $i_{1,\text{lim}}$ qui permet d'obtenir un angle de réfraction de $90^\circ = \frac{\pi}{2}$ rad (cas limite d'existence du rayon réfracté). Considérons dans ce cas un rayon incident faisant un angle d'incidence i_1 avec la normale au dioptre. On considère qu'un rayon réfracté existe tant que :

$$0 < i_2 < \frac{\pi}{2} \Leftrightarrow 0 < \sin(i_2) < 1.$$

Or, en, appliquant la loi de SNELL-DESCARTES de la réfraction, on a $n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$. Dans ce cas,

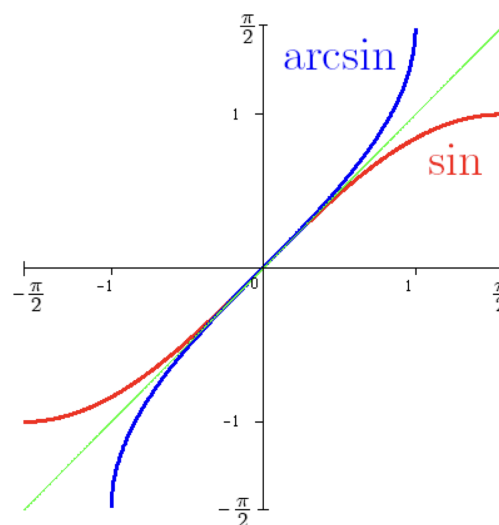
$$\sin(i_2) = \frac{n_1}{n_2} \sin(i_1).$$

On en déduit qu'il y a réfraction tant que :

$$0 < \frac{n_1}{n_2} \sin(i_1) < 1 \Leftrightarrow 0 < \sin(i_1) < \frac{n_2}{n_1} \Leftrightarrow 0 < i_1 < \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right).$$

NB : On remarque que $\frac{n_2}{n_1} < 1 \Leftrightarrow n_2 < n_1$ sans quoi $\arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$ ne serait pas défini. On déduit de tout cela un cas limite : le phénomène de réflexion totale apparaît dès-lors que :

$$i_1 > i_{1,\text{lim}} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right).$$



**Application n°3 : Réflexion totale à une interface air/eau**

▷ Dans le cas du dioptre entre l'air et l'eau (les deux sens sont possibles), déterminer les conditions pour avoir réflexion totale.

$n_{\text{air}} = 1,00$ et $n_{\text{eau}} = 1,33$.

III. Étude de la fibre optique à saut d'indice**III. 1 - Principe de fonctionnement**

▷ Une fibre optique à saut d'indice possède une structure en trois couches : un cœur d'indice $n_c \simeq 1,47$, entouré d'une gaine d'indice $n_g \simeq 1,45$ et d'une couche de protection opaque. Les rayons lumineux sont guidés dans la fibre par réflexions totales successives à l'interface entre le cœur et la gaine.

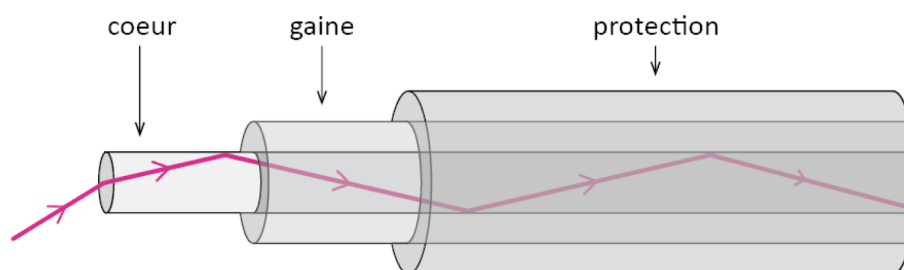


FIGURE 11 – Fibre optique à saut d'indice

III. 2 - Cône d'acceptance et ouverture numérique**Application n°4 : Détermination du cône d'acceptance d'une fibre à saut d'indice** ♥

▷ On considère une fibre optique à saut d'indice telle que celle présentée ci-dessus.

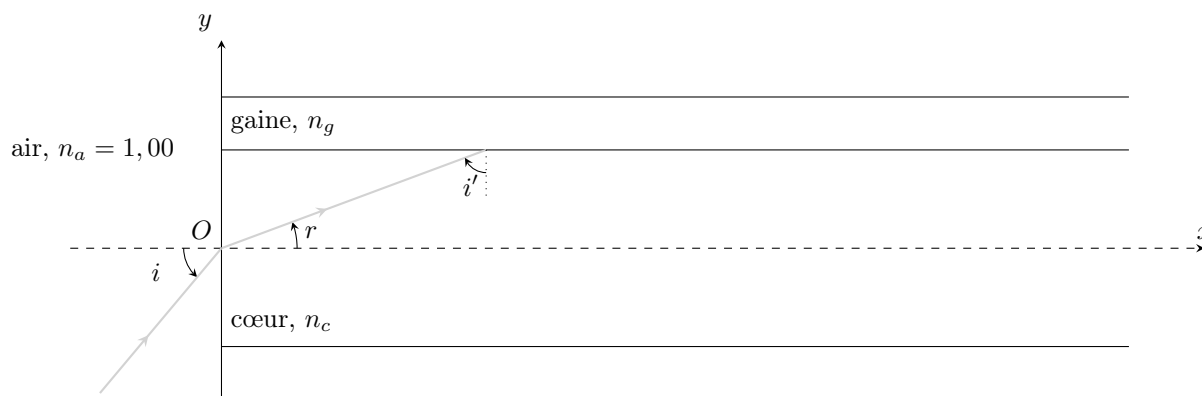


FIGURE 12 – Schéma d'une fibre optique à saut d'indice

▷ Dans toutes les questions, on pourra simplifier les calculs en prenant $n_a = 1,00$.

- Q 1. Indiquer la condition sur i' pour qu'un phénomène de réflexion totale se produise dans la fibre. Schématiser la suite de la marche du rayon lumineux dans la fibre.
- Q 2. En déduire une relation entre θ , n_c et n_g .
- Q 3. Enfin, montrer que $\sin(i) < \text{O.N}$ où O.N désigne l'ouverture numérique de la fibre à exprimer en fonction de n_c et n_g .
- Q 4. En déduire la valeur numérique de l'angle θ du cône d'acceptance de la fibre optique, puis le schématiser.

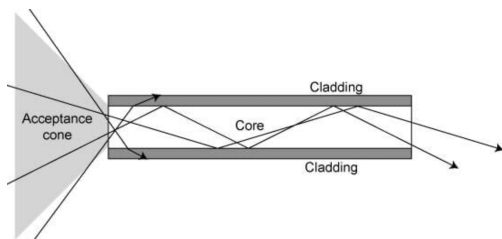
♥ Définition n°5 : ouverture numérique d'une fibre optique

▷ Un rayon est guidé par la fibre optique s'il l'atteint avec un angle tel que

$$\sin(i) \leq \text{O.N} \text{ où } \text{O.N} = \sqrt{n_c^2 - n_g^2},$$

ce qui définit l'ouverture numérique de la fibre.

♥ Définition n°6 : cône d'acceptance d'une fibre optique



On appelle cône d'acceptance d'une fibre optique le cône dans lequel doit se trouver un rayon entrant dans la fibre optique pour pouvoir être guidé. Le cône d'acceptance est caractérisé par son angle d'ouverture θ ou son ouverture numérique $\text{O.N} = \sin(\theta)$.

🔧 Application n°5 : Débit d'une fibre optique à saut d'indice

▷ Une fibre de longueur $L = 10$ km est éclairée par un faisceau conique de demi-angle $\alpha_{\max}$ tel que calculé précédemment. Ce faisceau est composé de rayons lumineux couvrant l'ensemble des angles d'incidences compris entre $\alpha = 0$ et $\alpha = \alpha_{\max}$.

- Q 1.** Exprimer la vitesse de propagation de la lumière dans le cœur de la fibre optique en fonction de la célérité de la lumière dans le vide c et de l'indice optique du cœur n_c . Pourquoi utilise-t-on des sources monochromatiques ?
- Q 2.** Quel est le rayon lumineux qui traverse le plus rapidement la fibre ? Déterminer l'expression de la durée de parcours T_1 de ce rayon. Faire un schéma de la situation.
- Q 3.** Quel est le rayon lumineux qui met le plus de temps pour traverser la fibre optique ? Déterminer l'expression de la durée de parcours T_2 de ce rayon. Ajouter ce rayon au schéma précédent.
- Q 4.** Montrer que la différence de temps de parcours entre les deux rayons précédents s'écrit :

$$\delta T = T_2 - T_1 = \frac{n_c(n_c - n_g)}{n_g} \times \frac{L}{c}$$

où n_g désigne l'indice optique de la gaine.

- Q 5.** Faire l'application numérique avec $n_c = 1,53$ et $n_g = 1,49$.

▷ L'intensité du faisceau lumineux en entrée de la fibre est maintenant modulée de telle sorte qu'on injecte dans la fibre des impulsions lumineuses de durée $\tau \ll \delta T$ répétées avec une période T_r , voir figure suivante :

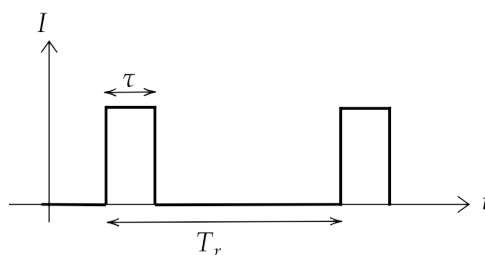


FIGURE 13 – Intensité lumineuse I en entrée de fibre en fonction du temps t

- Q 6.** Représenter l'allure de l'intensité en sortie de la fibre.
- Q 7.** Quelle durée minimale $T_{r,\min}$ doit séparer deux impulsions successives pour qu'elles ne se superposent pas en sortie de la fibre ?

- Q 8. En déduire le débit maximal $D_{\max}$ de la fibre en bits/s. Le débit est défini par la formule suivante $D = \frac{1}{T}$.
- Q 9. Calculer le temps nécessaire à la transmission d'un fichier de 100 Mo. Commenter.

**Définition n°7 : Dispersion intermodale**

► La **dispersion intermodale** est le phénomène d'étalement temporel des impulsions lumineuses lors de la propagation dans une fibre optique. Ceci est dû à la différence de temps de propagation entre les différents rayons lumineux compris dans le cône d'acceptance de la fibre.

C'est un des inconvénients de la fibre, car cette dispersion limite de le débit de la fibre, donc la quantité d'information qui peut se propager en un temps le plus petit possible.

