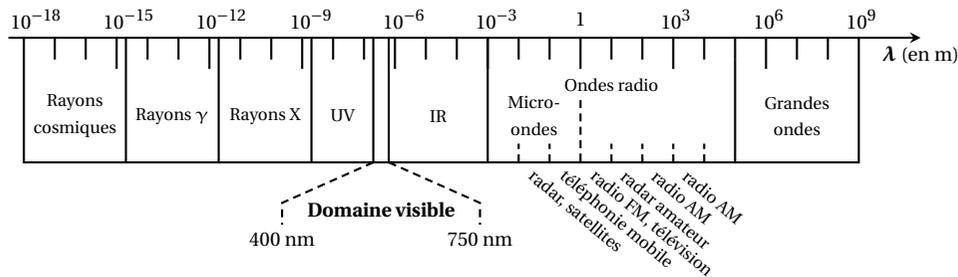


Chapitre 1 : Lois de Snell-Descartes

1 Lumière, source lumineuse

1.1 Spectre des ondes électromagnétiques

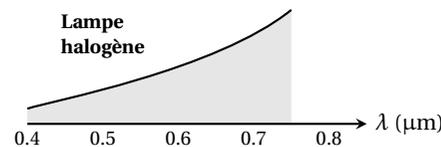
La lumière est une onde électromagnétique appartenant au domaine visible. On peut la caractériser par sa fréquence ν ou encore sa longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = \frac{c}{\nu}$, avec $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ la célérité de la lumière dans le vide. On rappelle ci-dessous les différents domaines du spectre des ondes électromagnétiques, en fonction de la longueur d'onde.



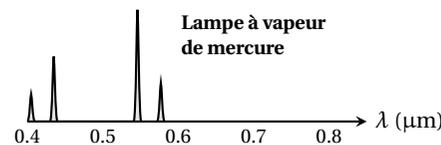
1.2 Spectre d'émission d'une source lumineuse

En optique on est amené à utiliser différentes sortes de sources lumineuses en fonction des expériences : soleil, lampe à incandescence, LED, lampe spectrale, laser, etc. Toutes ces sources ont leurs particularités et on peut notamment les distinguer selon la nature de leur **spectre d'émission**.

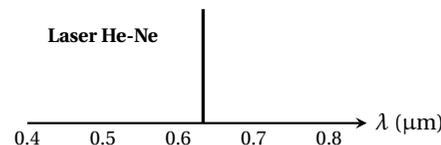
Les sources thermiques ont un spectre d'émission **continu** (il contient toutes les longueurs d'onde).



Les lampes spectrales ont un spectre d'émission **discret** (il contient uniquement certaines longueurs d'onde particulières).



Les lasers produisent une lumière **quasi-monochromatique** (c'est-à-dire qui ne contient qu'une seule longueur d'onde).



1.3 Modèle de la source ponctuelle monochromatique

Une source lumineuse est ponctuelle si toutes les ondes qu'elle émet sont issues d'un unique point. Elle est monochromatique si son spectre contient une seule longueur d'onde. En pratique une source réelle n'est jamais parfaitement monochromatique ni ponctuelle, mais ce modèle a tout de même une utilité pratique pour les raisons suivantes :

- Les différentes composantes spectrales d'une lumière polychromatique sont indépendantes les unes des autres, on peut donc les étudier séparément.
- Une source étendue est équivalente à un ensemble de sources ponctuelles indépendantes. On peut donc étudier séparément la lumière issue de chaque point appartenant à la source.

En résumé, il est pratique de se ramener au modèle de la source ponctuelle monochromatique pour simplifier l'étude de la propagation de la lumière. On peut ensuite assez simplement généraliser au cas d'une source étendue et polychromatique.

2 Optique géométrique

2.1 Milieu de propagation, indice de réfraction

Dans ce chapitre on se limite à l'étude des **milieux homogènes transparents isotropes** (ou MHTI).

- Un milieu est **homogène** si ses propriétés optiques sont les mêmes en tout point.
- Un milieu est **transparent** si la lumière est capable de le traverser.
- Un milieu est **isotrope** si ses propriétés optiques sont indépendantes de la direction de propagation de la lumière.

Indice de réfraction d'un MHTI

Dans un MHTI la lumière se propage à vitesse v constante. On définit l'**indice de réfraction** (ou **indice optique**) n d'un MHTI par la relation :

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

avec c la célérité de la lumière dans le vide. Puisqu'aucune onde ne peut se propager à une vitesse supérieure à c , on a $n \geq 1$ quelque soit le milieu.

L'indice de réfraction est sans unité, plus il est grand et plus on dit que le milieu est **réfringent**. On en donne quelques valeurs classiques dans le tableau ci-dessous :

Milieu	Air	Eau	Verre	Diamant
n	≈ 1	1,33	$\approx 1,5$	2,4

Remarque : On dit qu'un MHTI est **dispersif** si la vitesse de propagation de la lumière (autrement dit l'indice de réfraction) **dépend de la longueur d'onde** ($n(\lambda)$). De tels milieux ont le pouvoir de **décomposer la lumière blanche** en ses différentes composantes spectrales (comme les prismes par exemple).

Remarque : Quand une onde lumineuse change de milieu sa fréquence ν se conserve mais sa longueur d'onde varie : $\lambda = \frac{v}{\nu} = \frac{\lambda_0}{n}$ avec λ_0 la longueur d'onde dans le vide. Ainsi, une couleur ne peut être définie sans ambiguïté que par sa fréquence ou bien sa longueur d'onde **dans le vide**.

2.2 Approximation de l'optique géométrique

Lorsque l'on veut comprendre comment se forme une image par une lunette astronomique ou un microscope, il n'est pas nécessaire de faire intervenir la nature ondulatoire de la lumière. On peut interpréter ces phénomènes en assimilant la lumière à un ensemble de rayons qui se propagent en suivant un certain chemin, pouvant être dévié par un miroir ou un dioptre.

Bien sûr ce n'est pas le cas de toutes les expériences liées à la lumière : des phénomènes tels que la diffraction ou les interférences lumineuses ne peuvent être compris qu'en modélisant la lumière comme une onde.

Domaine de l'optique géométrique

Le domaine de l'optique géométrique correspond à l'ensemble des expériences qui peuvent s'interpréter en modélisant la lumière comme **un ensemble de rayons indépendants les uns des autres**.

Pour cela il faut que tous les miroirs et les dioptres rencontrés par la lumière soient de taille **très supérieure à sa longueur d'onde**.

2.3 Principe de Fermat

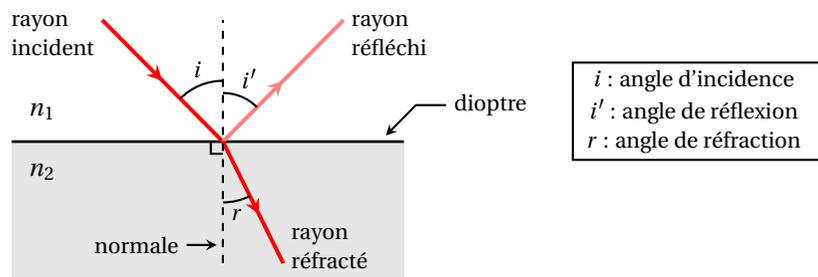
Principe de Fermat (1657)

La lumière se propage d'un point à un autre en suivant un chemin **qui rend son temps de parcours extrémal**.

- Dans un MHTI la lumière se propage en ligne droite.
- Principe de retour inverse de la lumière : **Le trajet suivi par la lumière, entre deux points A et B de l'espace, ne dépend pas de son sens de parcours.**
- Quand la lumière est réfléchi ou réfractée par un dioptre, elle vérifie les lois de Snell-Descartes.

3 Lois de Snell-Descartes

3.1 Vocabulaire



Le plan formé par le rayon incident et la normale s'appelle le *plan d'incidence*.

3.2 Énoncé

Les lois géométriques concernant la réfraction de la lumière ont été établies par le néerlandais Willebrord Snell en 1621. Elles ont été retrouvées, indépendamment selon toute vraisemblance, et plus largement diffusées par René Descartes en 1637.

Lois de la réflexion

- Le rayon réfléchi est contenu dans le plan d'incidence.
- L'angle d'incidence et l'angle de réflexion ont même mesure : $i' = i$.

Lois de la réfraction

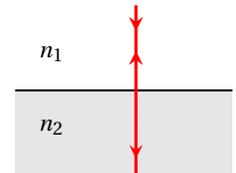
- Le rayon réfracté est contenu dans le plan d'incidence.
- L'angle de réfraction et l'angle d'incidence vérifient : $n_1 \sin i = n_2 \sin r$.

3.3 Conséquences

Propriété 1 : Incidence normale

Un rayon arrive sous **incidence normale** lorsqu'il est confondu avec la normale, c'est-à-dire lorsque $i = 0$.

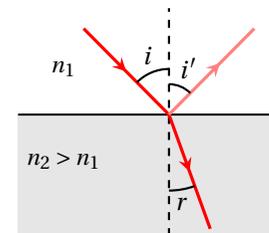
Un rayon qui arrive sous incidence normale **est réfracté sans être dévié**. Le rayon réfléchi est dévié d'un angle π et repart en sens inverse.



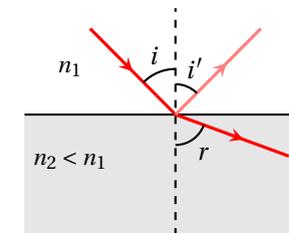
Propriété 2 : Sens de déviation d'un rayon réfracté

Un rayon qui se réfracte dans un milieu plus réfringent **se rapproche de la normale** ($r < i$).

Un rayon qui se réfracte dans un milieu moins réfringent **s'éloigne de la normale** ($r > i$).



réfraction dans un milieu plus réfringent



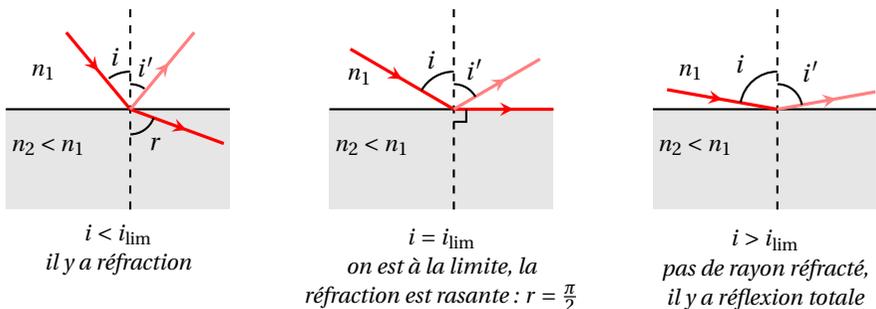
réfraction dans un milieu moins réfringent

Propriété 3 : Réflexion totale

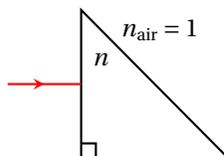
On parle de réflexion totale lorsque **toute l'énergie lumineuse est réfléchi par le dioptre**, il n'y a pas de rayon réfracté. Ce phénomène se produit si les deux conditions suivantes sont réunies :

$$\begin{cases} n_2 < n_1 \\ i > i_{\text{lim}} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \end{cases}$$

Dit autrement, il y a réflexion totale si le rayon incident se dirige vers un milieu moins réfringent et que l'angle d'incidence i dépasse une certaine valeur limite i_{lim} appelée **angle de réflexion totale**.



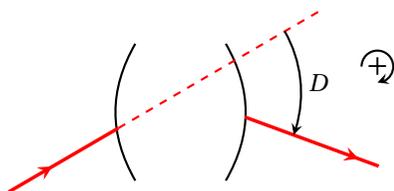
Exemple : Un prisme dont la coupe a la forme un triangle rectangle isocèle est constitué de verre d'indice n . Il est plongé dans l'air d'indice égal à 1. Un rayon lumineux arrive sous incidence normale sur l'une des faces opposée à l'hypothénuse. Déterminer la plus petite valeur de n pour laquelle il y a réflexion totale sur l'hypothénuse.



3.4 Angle déviation

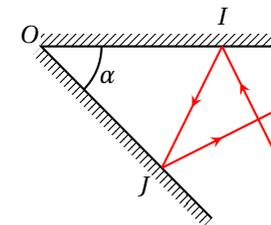
Angle de déviation

Lorsqu'un rayon lumineux est dévié par un système optique quelconque, on appelle **angle de déviation** l'écart angulaire (ici noté D) entre le rayon émergent et le **prolongement** du rayon incident, c'est-à-dire *le chemin qu'aurait suivi le rayon incident s'il n'avait pas été dévié*, il est communément tracé en ligne tiretée.



L'angle de déviation est **algébrique** : on le compte positivement ou négativement suivant le sens dans lequel le rayon est dévié. Pour fixer les signes on choisit arbitrairement un sens de rotation positif. Par exemple sur la figure ci-dessus on choisit le sens horaire comme sens positif, et on a $D > 0$.

Exemple : Deux miroirs d'arête commune passant par O forment entre eux un angle α . On note I et J les points incidents successifs, i et j les angles d'incidence correspondants.



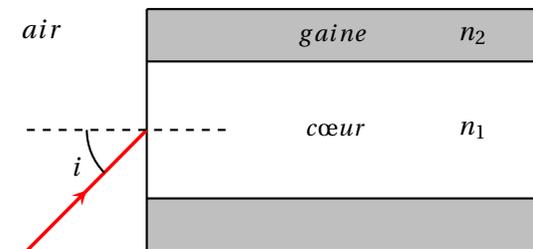
1. Exprimer en fonction de i la déviation D_I du rayon lors de la réflexion au point I . De même, exprimer D_J en fonction de j .
2. En considérant le triangle OIJ , établir la relation entre i , j et α .
3. En déduire la déviation totale D du rayon lumineux lors des deux réflexions, en fonction de l'angle α uniquement.
4. Que se passe-t-il si $\alpha = \frac{\pi}{4}$? Si $\alpha = \frac{\pi}{2}$? Faire des représentations schématiques.

4 Applications

4.1 Fibre optique à saut d'indice

4.1.1 Schéma de principe

Une fibre optique permet la propagation guidée de signaux lumineux dans le but de transmettre de l'information d'un point à un autre de l'espace. C'est une alternative à la propagation par câbles électriques qui présente l'avantage d'offrir un meilleur débit dans un spectre de fréquences plus large.



Une fibre optique à saut d'indice est composée de deux cylindres concentriques :

- Le **cœur**, constituée d'un matériau transparent d'indice n_1 .
- La **gaine**, de rayon plus grand, constituée d'un matériau d'indice $n_2 < n_1$.

La propagation s'effectue par réflexions totales successives sur le dioptre cœur/gaine. Pour cela les rayons doivent se propager en étant le moins incliné possible par rapport à l'axe de la fibre. Ce mode de propagation garantit une très faible atténuation du signal au cours de la propagation.

4.1.2 Cône d'acceptance

On se place dans le cas simplifié d'une fibre optique parfaitement rectiligne. Seuls les rayons incidents situés à l'intérieur d'un cône appelé **cône d'acceptance** sont guidés à l'intérieur de la fibre. On définit l'**ouverture numérique** de la fibre par $\text{ON} = \sin i_0$ où i_0 désigne le rayon angulaire du cône d'acceptance.

4.1.3 Dispersion intermodale

La propagation d'une impulsion lumineuse (conique) à l'intérieur d'une fibre optique conduit inévitablement à un élargissement temporel de cette impulsion, d'autant plus important que la fibre est longue et l'ouverture numérique importante. On parle de **dispersion intermodale**. Cela vient de ce que la distance parcourue par les rayons lumineux (et donc la durée de parcours) dans la fibre est d'autant plus importante que ceux-ci sont inclinés par rapport à l'axe. Pour quantifier ce phénomène, on détermine l'écart Δt entre le trajet le plus long ($i = i_0$) et le plus rapide ($i = 0$) : $\Delta t = t(i_0) - t(0)$.

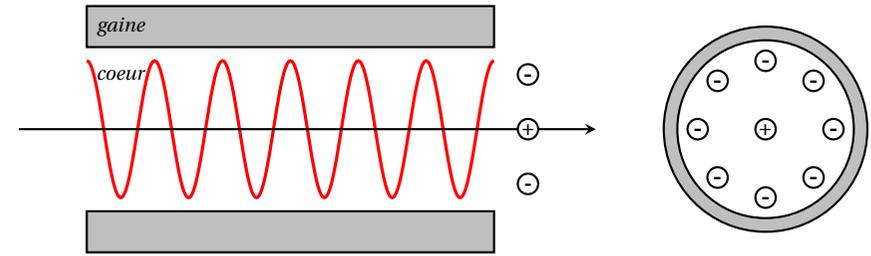
Pour éviter que deux impulsions successives se superposent et interfèrent entre elles, il est nécessaire que la période d'émission des impulsions incidentes soit au moins égale à Δt . Par conséquent, la dispersion intermodale **limite le débit d'une fibre optique**.

Application : on donne $n_1 = 1,500$ et $n_2 = 1,485$. Calculer le débit maximal d'une fibre de longueur $L = 1 \text{ km}$ en $\text{Mb} \cdot \text{s}^{-1}$ (mégabits par seconde).

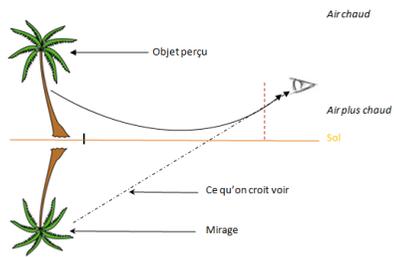
4.2 Propagation en milieu inhomogène

Dans un milieu inhomogène, les rayons lumineux ne se propagent plus en ligne droite mais sont courbés suivant les variations de l'indice optique. Beaucoup de situations physiques courantes comme les mirages sont provoquées par une inhomogénéité de la température dans l'atmosphère. On retient que les trajets des rayons lumineux se courbent toujours **dans le sens des indices croissants**.

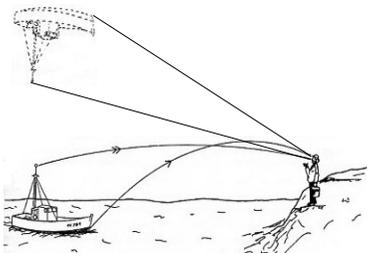
Une autre application concerne les fibres optiques à gradient d'indice, dans lesquelles l'indice varie continûment à l'intérieur du cœur, de manière à "piéger" les rayons lumineux et à les faire se propager dans la fibre.



Fibre à gradient d'indice



Mirages inférieurs



Mirages supérieurs