

Chapitre 1 : Lois de Snell-Descartes

1 Nature ondulatoire de la lumière

1.1 Historique

- Antiquité : Pour Platon et certains philosophes présocratiques, ce sont les yeux qui produisent les rayons lumineux. Ceux-ci se propagent en ligne droite.
- XVII^{ème} : Deux théories en compétition pour expliquer la réflexion et la réfraction de la lumière
 - Newton (1642 - 1721) : modèle balistique de la lumière. “La lumière est faite de corpuscules émis par les corps lumineux, se propageant en ligne droite dans l’espace, l’air et les corps transparents homogènes”. Newton est également le premier à comprendre, grâce à une expérience restée célèbre, que la lumière blanche n’est pas pure mais une superposition de différentes couleurs.
 - Huygens (1629 - 1695) : théorie ondulatoire de la lumière. Par analogie avec les ondes circulaires produites par la chute d’un caillou dans l’eau, Huygens imagine la lumière commune une onde mécanique qui se propage dans un milieu appelé “éther”, constitué d’une ensemble compact de petites particules qui se percutent les unes les autres.
- XIX^{ème} : Hégémonie de la théorie ondulatoire
 - Fresnel (1788 - 1872) : étude de la diffraction lumineuse.
 - Young (1773 - 1829) : étude des interférences lumineuses.
 - Maxwell (1831 - 1879) : 1873 - “Traité de l’électricité et du magnétisme” : Il formalise l’étude des phénomènes électromagnétiques sous la forme de quatre équations (les équations de Maxwell). À l’aide de ces dernières, il prédit notamment que la lumière est une onde électromagnétique et il donne la valeur de la célérité de ces ondes dans le vide. Ces prédictions seront vérifiées expérimentalement quelques années plus tard par Hertz (1857- 1894).
- début du XX^{ème} : L’ère de la mécanique quantique : la lumière est onde et corpuscule... et la matière aussi!
 - Effet photoélectrique : Certains matériaux éjectent des électrons lorsqu’ils sont éclairés par une source lumineuse, à condition que sa fréquence suffisamment élevée. Ce phénomène est inexplicable avec le formalisme ondulatoire de la lumière. En 1905, Einstein (1879 - 1955) résoud l’énigme en faisant l’hypothèse que la lumière est composée de corpuscules (appelés au départ *quanta* puis plus tard *photons*) dont l’énergie est proportionnelle à la fréquence. L’existence du photon sera vérifiée expérimentalement par Compton en 1923.
 - De Broglie (1892 - 1987) : En 1924, il introduit dans le vocabulaire la notion de “dualité onde-corpuscule” pour définir le comportement de la lumière, mais également de la matière. La nature ondulatoire et la nature corpusculaire de la lumière ne se contredisent pas ; il existe aujourd’hui une théorie quantique des champs électromagnétiques : **l’électrodynamique quantique**.

1.2 Spectre des ondes électromagnétiques

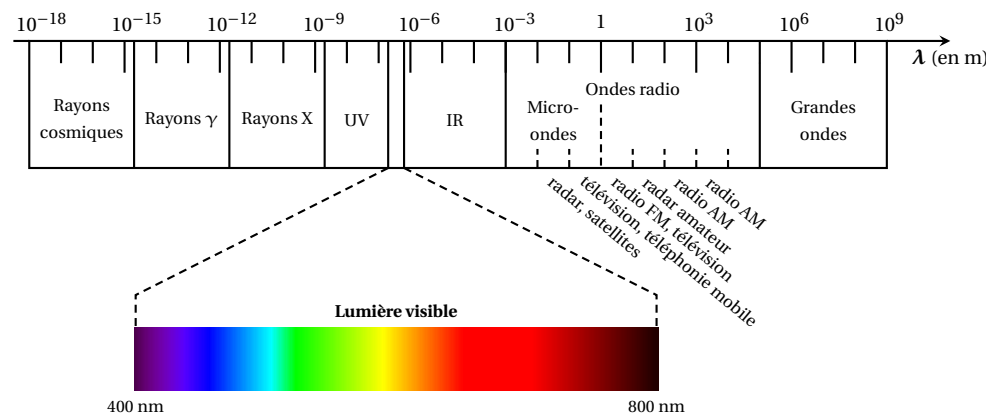
Une onde EM se propage dans le vide avec une célérité $c \sim 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Elle est caractérisée par sa fréquence ν , ou de manière équivalente par sa longueur d’onde dans le vide $\lambda_0 = c/\nu$.

Une onde EM est associée à la propagation de photons dont l’énergie est donné par la relation :

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

avec $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ est la constante de Planck. On exprime souvent l’énergie d’un photon en électron-volts (eV) :

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$



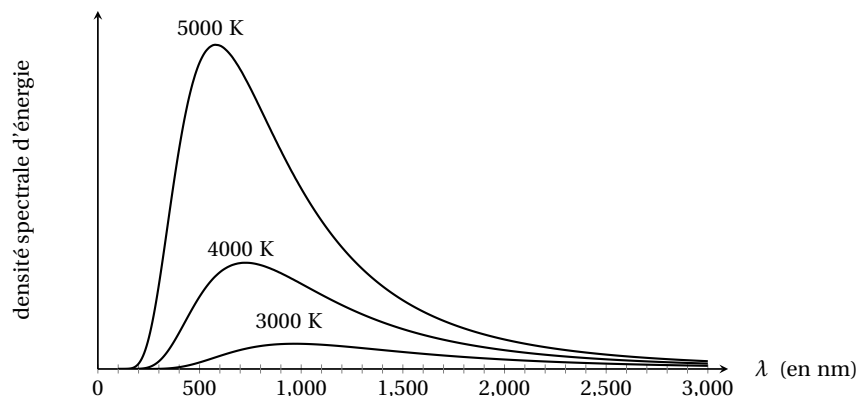
Exemples de production de rayonnement EM :

Rayons γ	Désintégration nucléaire, rayons cosmiques issus d'évènements très violents (supernovæ, trous noirs supermassifs)
Rayons X	accélération d'électrons (Bremsstrahlung, rayonnement synchrotron)
Rayons UV/visibles/IR	Source thermique (soleil, ampoule à incandescence), lampes à décharges, laser
Micro-ondes, ondes radio	Oscillations de charges électriques par utilisation de générateurs alternatifs (radars, antennes relais, etc...)

2 Sources lumineuses

Dans cette partie on s'intéresse à différents processus physiques qui permettent de produire de la lumière visible, chacun se caractérisant par une certaine allure du spectre lumineux.

2.1 Sources thermiques - rayonnement



Spectre d'une source thermique en fonction de la température de la source

Tout corps dont la température est différente du zéro absolu produit un rayonnement électromagnétique dont l'énergie est répartie de manière **continuë** en fonction de la fréquence (ou de la longueur d'onde, ce qui revient au même) ; c'est le **rayonnement thermique**. La répartition de l'énergie émise n'est pas la même à toute longueur d'onde ; l'allure de cette répartition, qui a la forme d'une courbe en cloche, est représentée ci-dessus.

On connaît depuis la fin du XIX^{ème} siècle certaines propriétés importantes du rayonnement thermique :

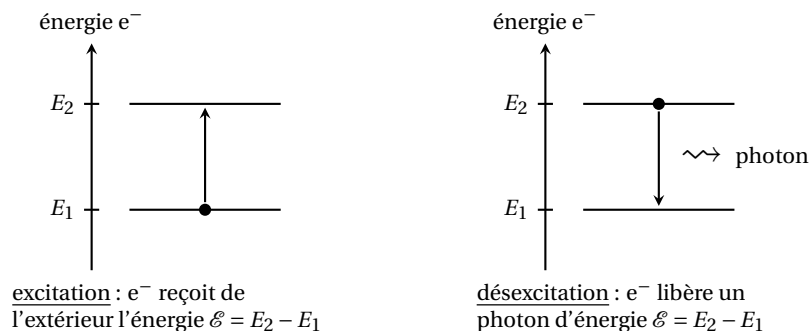
- la puissance totale rayonnée par un corps est proportionnel à T^4 , où T est la température absolue du corps supposé homogène (loi de Stefan) ;
- la longueur d'onde correspondant au maximum d'émission est inversement proportionnelle à T (loi du déplacement de Wien).

Pour le soleil, dont la température de surface est d'environ 5000K, le maximum de rayonnement se situe dans le visible. À température ambiante le rayonnement est situé dans l'infrarouge lointain. Ce processus est notamment à l'origine du phénomène de **l'incandescence**, c'est-à-dire le fait qu'un corps devient lumineux lorsqu'il est porté à haute température (rouge, jaune puis blanc à mesure que la température s'élève, et donc que le spectre se déplace vers les faibles longueurs d'onde).

Historiquement le spectre du rayonnement thermique a eu une grande importance dans l'émergence de la théorie quantique. Les lois de la thermodynamique et de l'électromagnétisme, connues au tournant du XX^{ème} siècle, ne permettaient pas d'expliquer l'allure de ce spectre. En 1900, le physicien Max Planck apporta une réponse à cette énigme en formulant une hypothèse de quantification ; c'était l'une des premières pierres d'un édifice qui allait s'ériger progressivement dans les décennies suivantes pour devenir la physique quantique telle que nous la connaissons aujourd'hui.

2.2 Lampes à décharge - émission spontanée

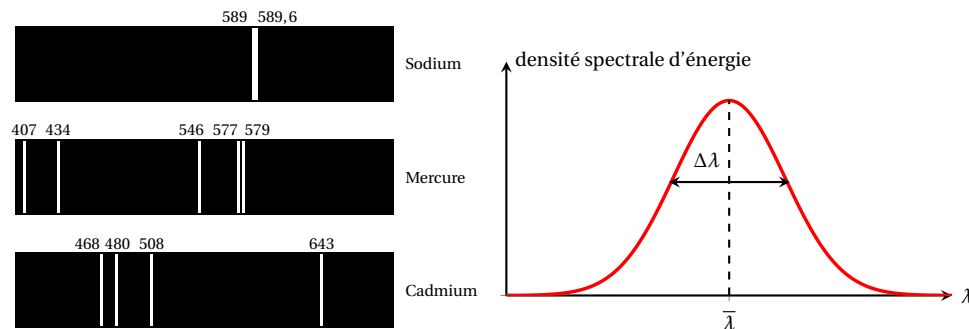
Dans un atome les électrons ne peuvent posséder que certaines énergies particulières (on parle de **niveaux d'énergie électroniques**). Un électron peut aller dans un niveau d'énergie plus élevé s'il reçoit de l'extérieur la quantité d'énergie suffisante, égale à l'écart entre les deux niveaux ; à l'inverse si un électron passe d'un niveau plus élevé à un niveau plus bas il libère son excédent d'énergie, égale à la différence entre les deux niveaux, sous la forme d'un photon (voir schéma ci-après).



Dans l'ampoule d'une lampe spectrale on trouve un gaz (hélium, mercure ou sodium par exemple), à plus ou moins faible pression, et un circuit électrique relié à deux électrodes. Un générateur de haute tension crée entre les électrodes un arc électrique ; les électrons libres de cet arc fournissent aux électrons des atomes du gaz, par collision inélastique, l'énergie suffisante pour aller dans un niveau d'énergie plus élevé. Après un certain temps, une désexcitation se produit spontanément dans un niveau d'énergie plus bas et s'accompagne de l'émission d'un photon ; c'est **l'émission spontanée**. L'énergie du photon (donc sa longueur d'onde, voir 1.2.) dépend des niveaux correspondant à la transition électronique.

Le processus d'émission spontanée confère des propriétés particulières au spectre d'émission des lampes à décharges :

- il est **discret**, c'est-à-dire qu'il ne contient que certaines longueurs d'ondes (on parle de "raies", voir ci-dessous). En effet à chaque transition électronique correspond une énergie donnée pour le photon et donc une longueur d'onde bien définie ($\lambda = hc/(E_2 - E_1)$, voir paragraphe 1.2).
- il est **caractéristique de l'élément chimique** utilisé dans l'ampoule puisque chaque atome a des niveaux d'énergie électroniques spécifiques.



Portion visible du spectre de plusieurs lampes à décharge (les valeurs numériques sont exprimées en nm)

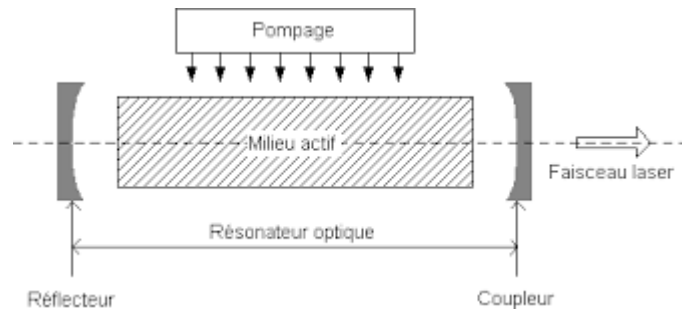
Profil spectral d'une raie d'une lampe à décharge

L'éclairage public est encore majoritairement assuré par ce type de lampes qui ont un bien meilleur rendement énergétique que les lampes à incandescence, bien qu'elles soient actuellement progressivement remplacées par des ampoules à LED, de consommation équivalente mais qui permettent d'obtenir un éclairage plus proche de la lumière blanche.

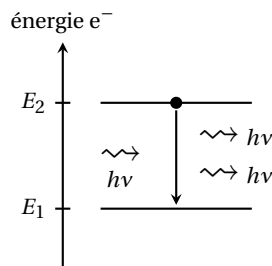
Rq : plusieurs effets physiques font qu'en réalité les raies d'émission ne sont pas infiniment fines, mais ont une certaine largeur (de l'ordre de 0,1 nm pour une lampe haute pression (HP) et 1 pm pour une lampe basse pression (BP)).

2.3 Lasers - émission stimulée (ou induite)

Le principe du laser consiste à amplifier une onde lumineuse en la faisant interagir avec de la matière (milieu *optiquement actif*). Grâce à des miroirs sphériques formant une cavité optique on peut sélectionner les longueurs d'ondes émises ; celles-ci correspondent aux **modes propres** de la cavité.



Lorsqu'un électron d'un atome du milieu actif se trouve dans un état excité (d'énergie E_2), l'arrivée d'un photon d'énergie $E_2 - E_1$ peut **provoquer** sa désexcitation vers le niveau E_1 . Ce faisant, il y a émission d'un deuxième photon de caractéristiques **identiques au photon incident** (mêmes énergie, fréquence, direction de propagation, polarisation, phase). Ce processus, appelé **émission stimulée**, permet d'envisager l'amplification de l'onde lumineuse dans la cavité.

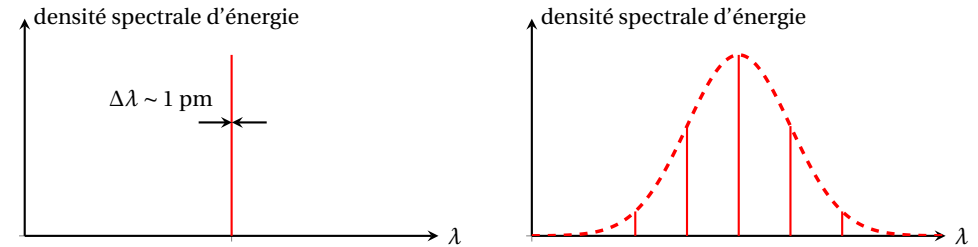


émission stimulée : production d'un deuxième photon d'énergie $\mathcal{E} = h\nu = E_2 - E_1$

L'étude théorique des interactions lumière/matière dans le milieu actif montre que l'amplification n'est possible qu'à condition que parmi les atomes du milieu actif le niveau E_2 soit plus peuplé que le niveau E_1 (on considère ici pour simplifier que l'effet laser est dû à la transition entre ces deux seuls niveaux). Or à l'équilibre thermique c'est toujours le niveau le plus bas en énergie (autrement dit le plus stable)

qui est le plus peuplé ; l'amplification ne peut pas apparaître spontanément à l'équilibre thermique. Pour réaliser *l'inversion de population* il faut alimenter le milieu actif avec une source d'énergie extérieure (on parle de **pompage**, il en existe plusieurs techniques que l'on ne détaillera pas ici).

Le profil spectral d'un faisceau laser est constitué d'une ou plusieurs raies très fines (correspondant aux modes propres de la cavité), situées sous une enveloppe dont la largeur, de l'ordre du picomètre, est fixée par l'effet Doppler.



Les lasers à gaz sont très directionnels (angle de diffraction $\theta \sim 1'$) tandis que les diodes laser, fabriquées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, produisent un faisceau beaucoup plus ouvert ($\theta \sim 30^\circ$).

2.4 Source ponctuelle monochromatique

Une source lumineuse est ponctuelle si tous les rayons lumineux qu'elle émet sont issus d'un unique point de l'espace. Elle est monochromatique si elle émet une onde de fréquence (donc de longueur d'onde) unique. Une source réelle n'est jamais parfaitement monochromatique ni ponctuelle, mais on peut s'arranger pour réaliser des conditions expérimentales dans lesquelles le modèle de source ponctuelle et monochromatique est une bonne approximation :

- Un laser réalise une excellente approximation de source monochromatique ($\Delta\lambda/\lambda \sim 10^{-6}$ pour un laser multimode, on peut atteindre 10^{-9} à 10^{-14} avec des lasers monomodes).
- On peut réaliser une source quasi-ponctuelle en faisant converger un faisceau lumineux à l'aide d'un système de lentilles. La diffraction empêche un faisceau lumineux de converger exactement en un point. La taille minimale de la zone de convergence est de l'ordre de grandeur de **la longueur d'onde**.

3 Optique géométrique

3.1 Milieu de propagation, indice de réfraction

La lumière se propage dans le vide à la vitesse c mais dans un milieu matériel, la célérité v d'une onde lumineuse est toujours inférieure à c . On caractérise **l'indice de réfraction (ou indice optique)** n d'un milieu matériel transparent par la relation :

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

$n \geq 1$ quelque soit le milieu. L'indice de réfraction est une grandeur qui quantifie la **réfringence** d'un milieu matériel, c'est-à-dire la capacité d'un milieu à réfracter un rayon lumineux qui y entre. Plus n est grand et plus le milieu est réfringent.

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

L'indice dépend surtout du milieu. Dans une moindre mesure, il peut dépendre de la longueur d'onde ou de la température.

- Un milieu est **homogène** si n a la même valeur en tout point (pour une longueur d'onde donnée).
- Un milieu est **isotrope** si n ne dépend pas de la direction de propagation de la lumière.
- Un milieu est **transparent** s'il n'atténue pas la lumière qui le traverse.
- Un milieu est **dispersif** si n dépend de λ .

Il est important de noter que dans un milieu d'indice $n \neq 1$, la longueur d'onde n'est pas la même que dans le vide ($\lambda = \lambda_0/n$). Ainsi, une couleur ne peut être définie sans ambiguïté que par sa longueur d'onde dans le vide.

3.2 Approximation de l'optique géométrique

Malgré l'avènement de la physique quantique, la théorie électromagnétique de Maxwell demeure à l'heure actuelle le cadre conceptuel et mathématique qui permet de formaliser la grande majorité des expériences liées à la lumière. Pourtant la construction d'une théorie des systèmes optiques (lunette, télescope, microscope, œil, etc.), constitués de dioptrés, lentilles et/ou miroirs, est antérieure à Maxwell de presque deux siècles, grâce notamment aux travaux de Galilée, Kepler, Snell, Descartes, Newton, Huygens ou encore van Leeuwenhoek. On sait aujourd'hui que dans des conditions expérimentales bien particulières, la propagation des ondes lumineuses est régie par des lois très simples faisant intervenir uniquement la direction de propagation de la lumière et l'indice de réfraction des milieux traversés. Ces conditions constituent ce que l'on appelle le **domaine de l'optique géométrique** ; elles sont généralement bien vérifiées à l'échelle des instruments optiques de la vie courante, ce qui explique pourquoi, bien avant de savoir que la lumière est une onde électromagnétique, des scientifiques ont pu formaliser l'étude des systèmes optiques en utilisant simplement des calculs géométriques et trigonométriques !

On dit que l'on se trouve dans les conditions de l'optique géométrique si **l'intensité lumineuse et l'indice de réfraction varient peu à l'échelle de la longueur d'onde**.

Dans la pratique, nous considérerons que ces conditions sont remplies lorsque la lumière rencontre des milieux (dioptrés, lentilles, miroirs) dont la taille est grande devant λ .

Le domaine de l'optique géométrique exclut tout ce qui se rapporte au comportement ondulatoire de la lumière : diffraction, interférences, polarisation.

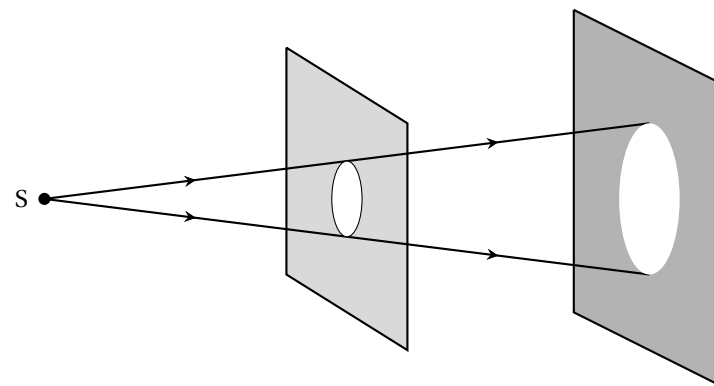
3.3 Fondements de l'optique géométrique

3.3.1 Faisceau, rayon lumineux

L'optique géométrique s'intéresse à la façon dont la direction de propagation de la lumière dépend de l'indice des milieux traversés ; elle suppose implicitement qu'au cours de sa propagation la lumière décrit une certaine **trajectoire**, autrement dit que l'on peut réduire la propagation de la lumière à une courbe mathématique, appelée **rayon lumineux**.

Un rayon lumineux est une construction mathématique qui s'identifie **au chemin suivi par l'énergie lumineuse** au cours de sa propagation, lorsque l'on se trouve dans les conditions de l'optique géométrique.

L'expérience commune ne nous permet pas de voir des rayons lumineux uniques (au sens mathématique d'une courbe d'épaisseur nulle) mais plutôt une portion macroscopique de l'espace parcourue par une onde lumineuse ; on l'appelle **faisceau lumineux**. Dans le domaine de l'optique géométrique, **on peut assimiler un faisceau lumineux à un ensemble de rayons indépendants les uns des autres**.



Un rayon lumineux est un objet conceptuel par essence puisqu'il est impossible d'en isoler un par l'expérience. Si l'on tente de réduire la taille d'un faisceau lumineux à l'aide d'un diaphragme de diamètre de plus en plus faible, le faisceau finit par s'étaler par diffraction !

3.3.2 Principe de Fermat

La lumière se propage dans l'espace sur une trajectoire telle que la durée de parcours est extrême.

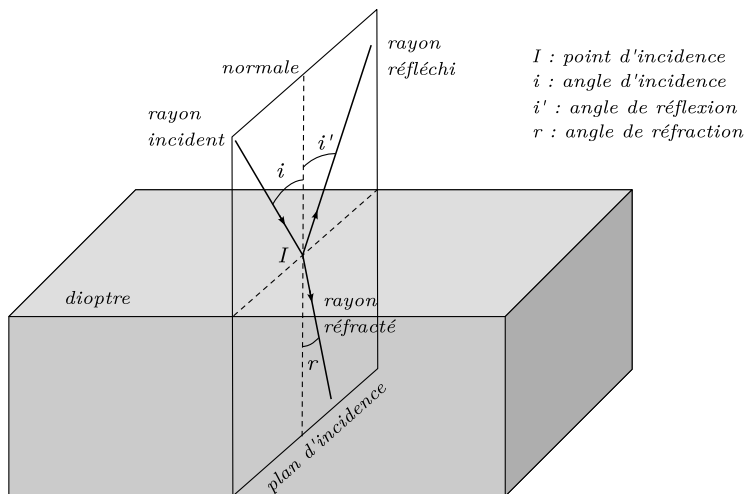
Ce principe, énoncé par Pierre de Fermat en 1657, a plusieurs conséquences importantes :

- 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.**

4 Lois de Snell-Descartes

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.

4.1 Vocabulaire



4.2 Lois de la réflexion

- Le rayon réfléchi est contenu dans le plan d'incidence.
- L'angle d'incidence et l'angle de réflexion sont égaux.

$$i' = i$$

4.3 Lois de la réfraction

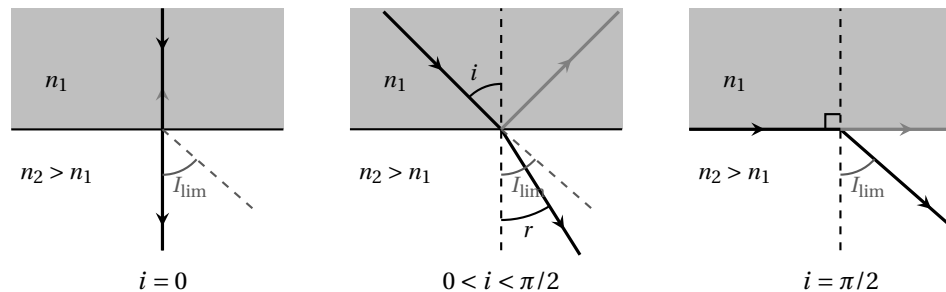
- Le rayon réfracté est contenu dans le plan d'incidence.
- L'angle de réfraction et l'angle d'incidence vérifient :

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r$$

4.3.1 Angle de réfraction limite

Un rayon lumineux **se rapproche de la normale** lorsqu'il passe d'un milieu **moins** réfringent vers un milieu **plus** réfringent. Lorsque l'angle d'incidence vaut $\pi/2$, l'angle de réfraction prend une valeur maximale, appelée **angle de réfraction limite**. Par définition :

$$I_{\text{lim}} = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\right)$$

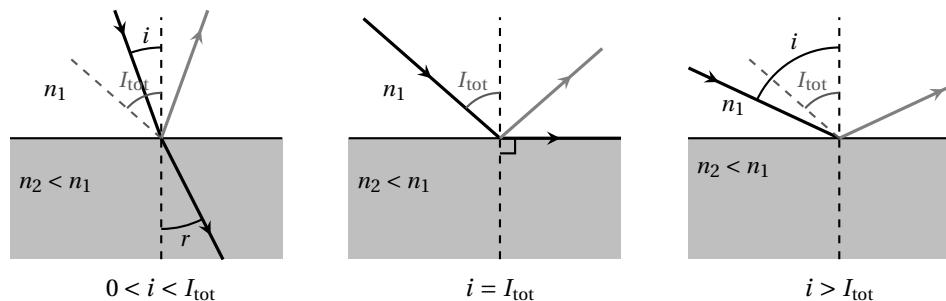


4.3.2 Angle de réflexion totale

Un rayon lumineux **s'éloigne de la normale** lorsqu'il passe d'un milieu **plus** réfringent vers un milieu **moins** réfringent. Le rayon réfracté n'existe que pour un angle d'incidence inférieur à l'angle de réflexion totale. Au delà de cet angle I_{tot} , le seul rayon émergent du dioptre est le rayon réfléchi. On parle alors de **réflexion totale**. Par définition :

$$I_{\text{tot}} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

Rq : D'après le principe de retour inverse de la lumière, I_{lim} et I_{tot} sont les mêmes pour un dioptre donné.

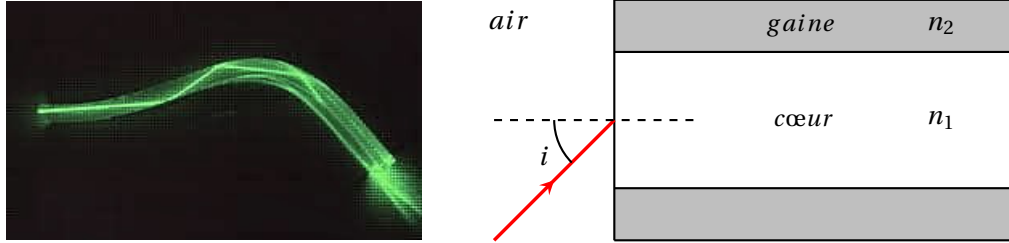


5 Applications

5.1 Fibre optique à saut d'indice

5.1.1 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 dioptr 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.

5.1.2 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.

5.1.3 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 ($i = 0$) : $\Delta t = t(i_0) - t(0)$.

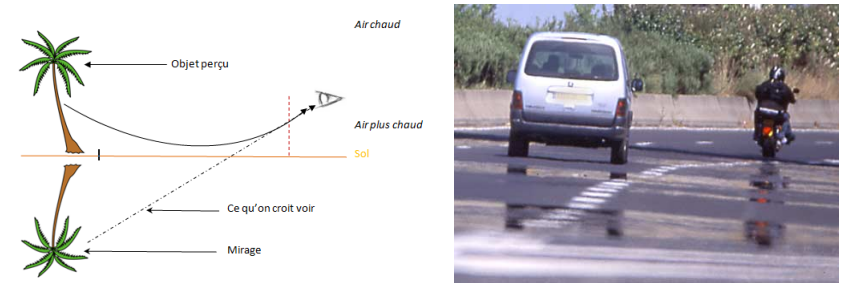
Pour éviter que deux impulsions successives se superposent et interfèrent entre elles, il est nécessaire que la période d'émission des impulsions incidentes soit au moins égale à Δt . Par conséquent, la dispersion intermodale **limite le débit d'une fibre optique**.

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).

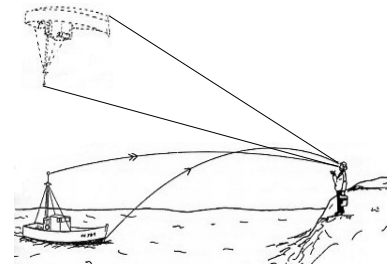
5.2 Propagation en milieu inhomogène

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**.

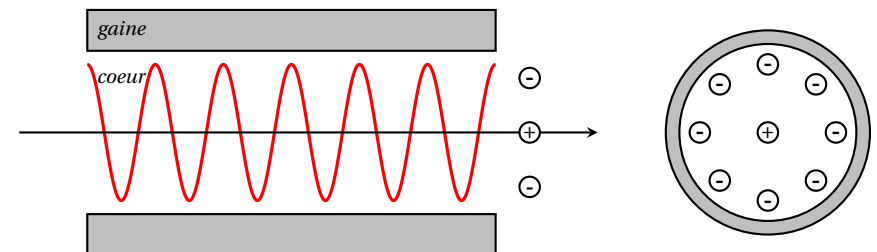
Une autre application concerne les fibres optiques à gradient d'indice, dans lesquelles l'indice varie continûment à l'intérieur du cœur, de manière à "piéger" les rayons lumineux et à les faire se propager dans la fibre.



Mirages inférieurs



Mirages supérieurs



Fibre à gradient d'indice