LES LOIS DE L'OPTIQUE GEOMETRIQUE
LE MODELE DE RAYONS LUMINEUX

« Les livres sont la lumière qui guide la civilisation »
Franklin Delano Roosevelt

I – LA LUMIERE : LES DIFFERENTS MODELES

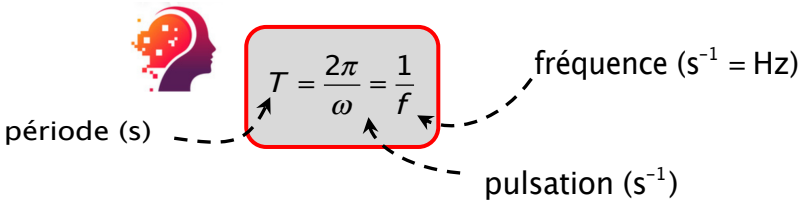
La lumière est une entité physique réelle mais sa nature est difficile à appréhender. La lumière est le **caméléon du monde physique**. Selon les circonstances, la lumière se comporte comme un faisceau **de particules** voyageant en ligne droite, comme **une onde** à l'image du son ou des vagues sur l'eau ou encore les deux à la fois.

Il existe une théorie quantique (l'électrodynamique quantique) qui permet de décrire tous les phénomènes lumineux avec une très grande précision (c'est la théorie la plus précise que l'on possède) mais il s'agit d'une théorie très complexe. Il est plus simple, suivant les circonstances physiques, d'utiliser tel ou tel modèle (plus élémentaire) pour décrire les phénomènes lumineux.

1.1 Le modèle ondulatoire (étudié en classe de PT)

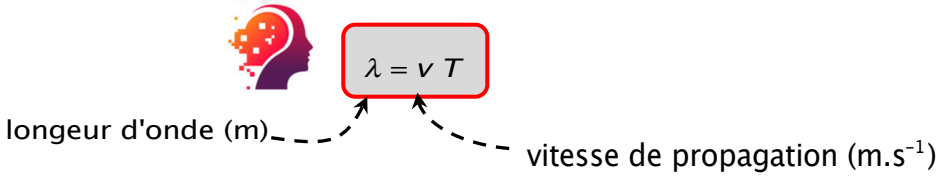
Il s'agit d'un modèle très utilisé. Il permet en particulier de comprendre les phénomènes **d'interférences** et de **diffractions**. Dans ce modèle, la lumière est une « onde » qui se propage dans l'espace et dans le temps. La grandeur qui se propage et qui oscille de façon périodique est le champ électromagnétique $\left(\vec{E},\vec{B}\right)$. L'onde possède une double périodicité :

- Temporelle (intrinsèque)



Au bout d'un intervalle de temps $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f}$, le champ électrique $\vec{E}$ et le champ magnétique $\vec{B}$ redeviennent identiques à eux mêmes : $\vec{E}\left(x,t+T\right) = \vec{E}\left(x,t\right)$ et $\vec{B}\left(x,t+T\right) = \vec{B}\left(x,t\right)$.

- Spatiale (liée à la vitesse de propagation dans le milieu considéré)



Après une distance de $\lambda = v\,T$, le champ électrique $\vec{E}$ et le champ magnétique $\vec{B}$ redeviennent identiques à eux-mêmes : $\vec{E}\left(x+\lambda,t\right) = \vec{E}\left(x,t\right)$ et $\vec{B}\left(x+\lambda,t\right) = \vec{B}\left(x,t\right)$.

Dans le vide, la vitesse de la lumière est une constante et vaut $c = 2{,}99792458 \times 10^{8}$ m.s^{-1} (exactement) pour toutes les fréquences. Dans la matière, la vitesse de propagation de la lumière est telle que $v < c$ et v dépend de la fréquence.

L'œil n'est capable de voir qu'une faible partie du spectre des ondes électromagnétiques (que l'on appelle justement lumière) compris approximativement entre 400 nm pour le violet/bleu et 800 nm pour le rouge/ infrarouge.

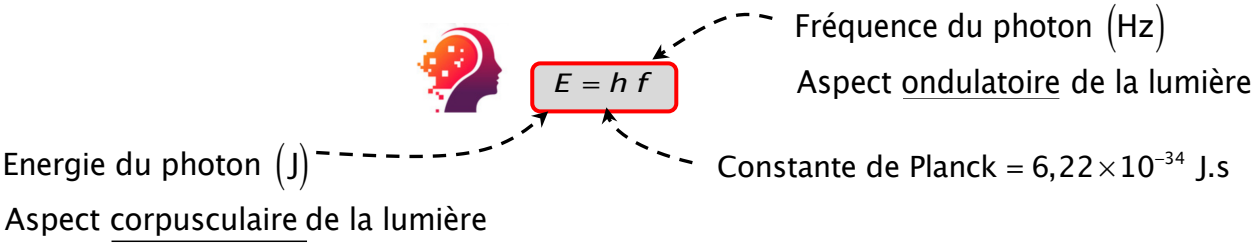
1.2 Le modèle géométrique ; notion de rayons lumineux

Ce modèle repose sur le fait que, dans de nombreux cas, la lumière se propage en **ligne droite** suivant des **« rayons lumineux »** qui indique la direction et le sens de propagation de l'énergie lumineuse. C'est ce que l'on va étudier cette année. Ce modèle est une approximation du modèle ondulatoire et n'est donc pas toujours compatible avec les phénomènes observés.

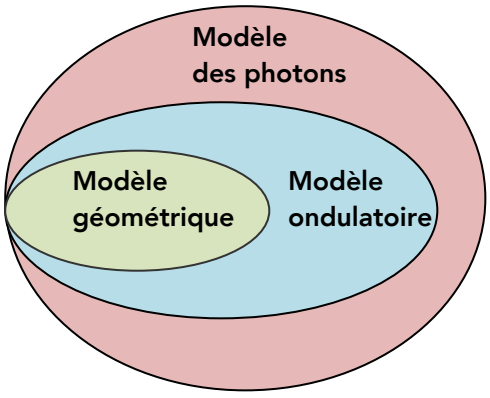
1.3 Le modèle des photons

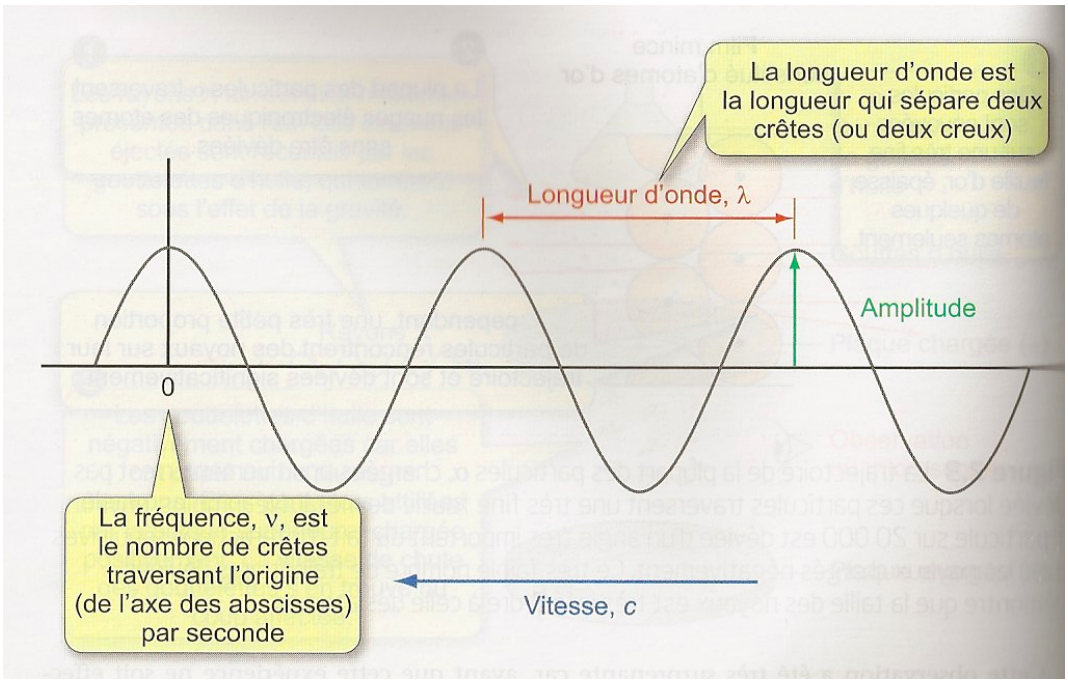
C'est le modèle le plus sophistiqué et le plus complet (il englobe les deux autres). Il fait appel à la physique quantique.

La lumière est constituée **de photons** qui se comportent, suivant les circonstances, comme une onde ou comme une particule (ou corpuscule) de **masse nulle** qui se propage toujours **à la vitesse $\mathbf{c = 2{,}99792458 \times 10^{8}\ m.s^{-1}}$ dans le vide** (un photon n'est jamais au « repos »). L'énergie transportée par un photon de fréquence f est donnée par la relation de Planck-Einstein :



La figure ci-dessous résume l'imbrication des différents modèles de la lumière à l'image des poupées Russes.





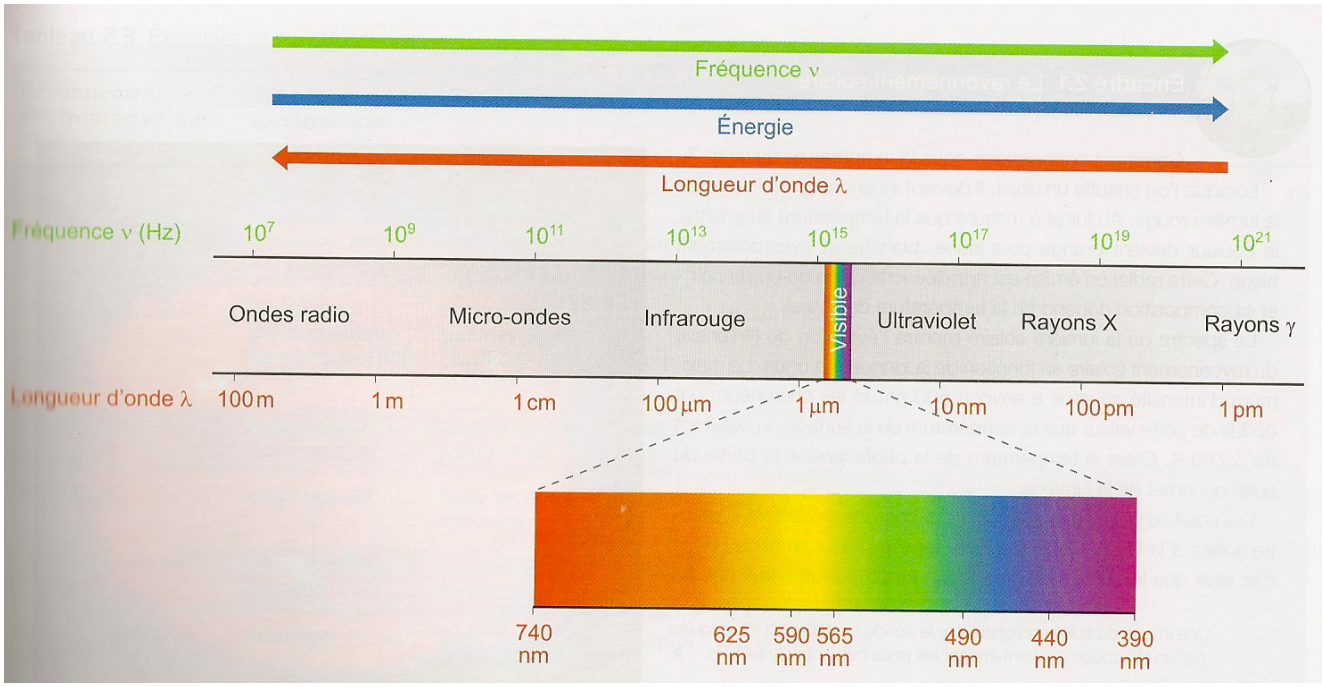


TABLE 3.4 Approximate Frequency and Vacuum Wavelength Ranges for the Various Colors

Color	λ_0 (nm)	ν (THz)*
Red	780–622	384–482
Orange	622–597	482–503
Yellow	597–577	503–520
Green	577–492	520–610
Blue	492–455	610–659
Violet	455–390	659–769

*1 terahertz (THz) = 10^{12} Hz, 1 nanometer (nm) = 10^{-9} m.

II – EMISSION DE LUMIERE : INTERACTION LUMIERE-MATIERE

2.1 Emission spontanée de la lumière

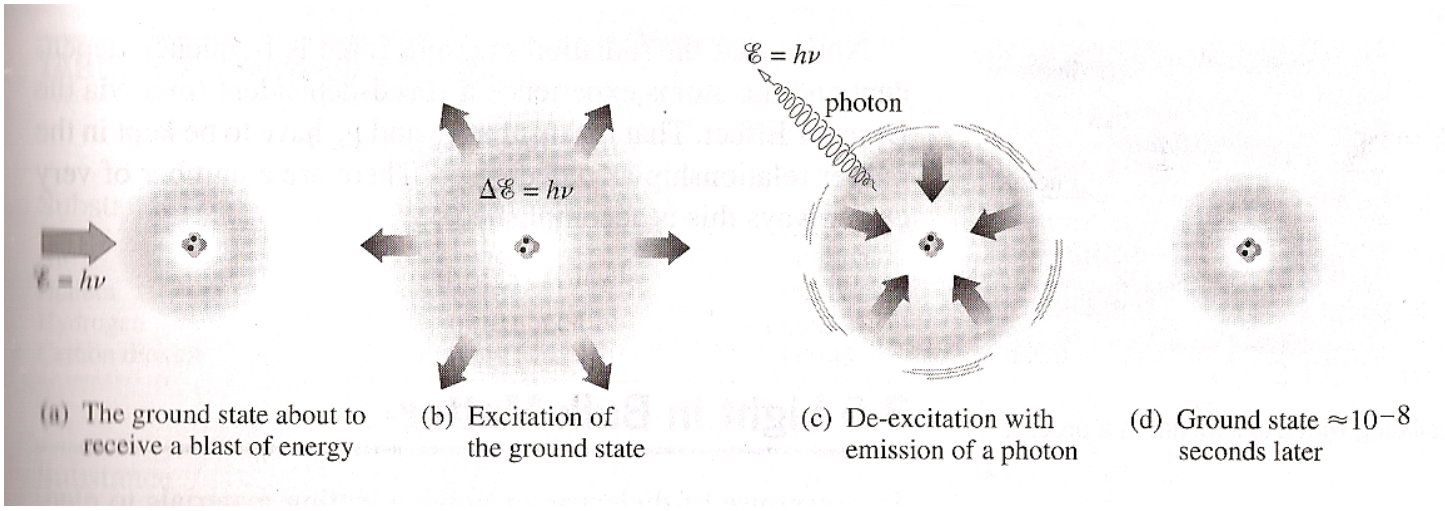


Figure 3.35 The excitation of an atom. (*a*) Energy in the amount $h\nu$ is delivered to the atom. (*b*) Since this matches the energy needed to reach an excited state, the atom absorbs the energy and attains a higher energy level. (*c*) With the emission of a photon, it drops back (*d*) and returns to the ground state in about 10^{-8} s.

Dans les sources usuelles, dites sources thermiques (lampe à incandescence, lampe fluo compacte, LED etc…), le mode dominant d'émission de lumière est **l'émission spontanée**. La lumière est un ensemble de trains d'ondes sinusoïdaux ou de photons se propageant dans l'espace à partir des sources lumineuses. C'est au niveau de l'atome (ou de la molécule) que se produisent les phénomènes lumineux d'émission ou absorption). La figure ci-contre donne une représentation simplifiée et très schématique de cette interaction du rayonnement avec la matière.

Quand un système atomique reçoit du milieu extérieur un supplément d'énergie (absorption d'énergie thermique ou électrique), les électrons périphériques (électron de valence) des atomes sont portés à des niveaux d'énergie élevés : un électron transite d'une couche à une autre plus externe (transition électronique), l'atome passe dans un **état excité instable** (cf. cours de chimie sur la structure électronique de l'atome).

Les atomes ne peuvent rester dans un état excité que pendant une courte durée de l'ordre de 10^{-10} s. Lors de leur **désexcitation spontanée**, ils retombent à l'état fondamental, en libérant l'énergie sous forme de trains d'ondes successifs de courte durée, de l'ordre de 10^{-9} s, qui correspondent à des photons d'énergie $E_f - E_1 = h\,f$.

Les photons sont émis dans des directions quelconques et à des instants quelconques. Les trains d'ondes lumineuses, produits lors de la désexcitation de différents atomes du milieu actif, n'ont aucune relation de phases entre eux (cf. cours d'optique de PT). On dit que la lumière produite par émission spontanée (cas des sources usuelles) est **incohérente**.

2.2 Emission stimulée de la lumière, rayonnement laser

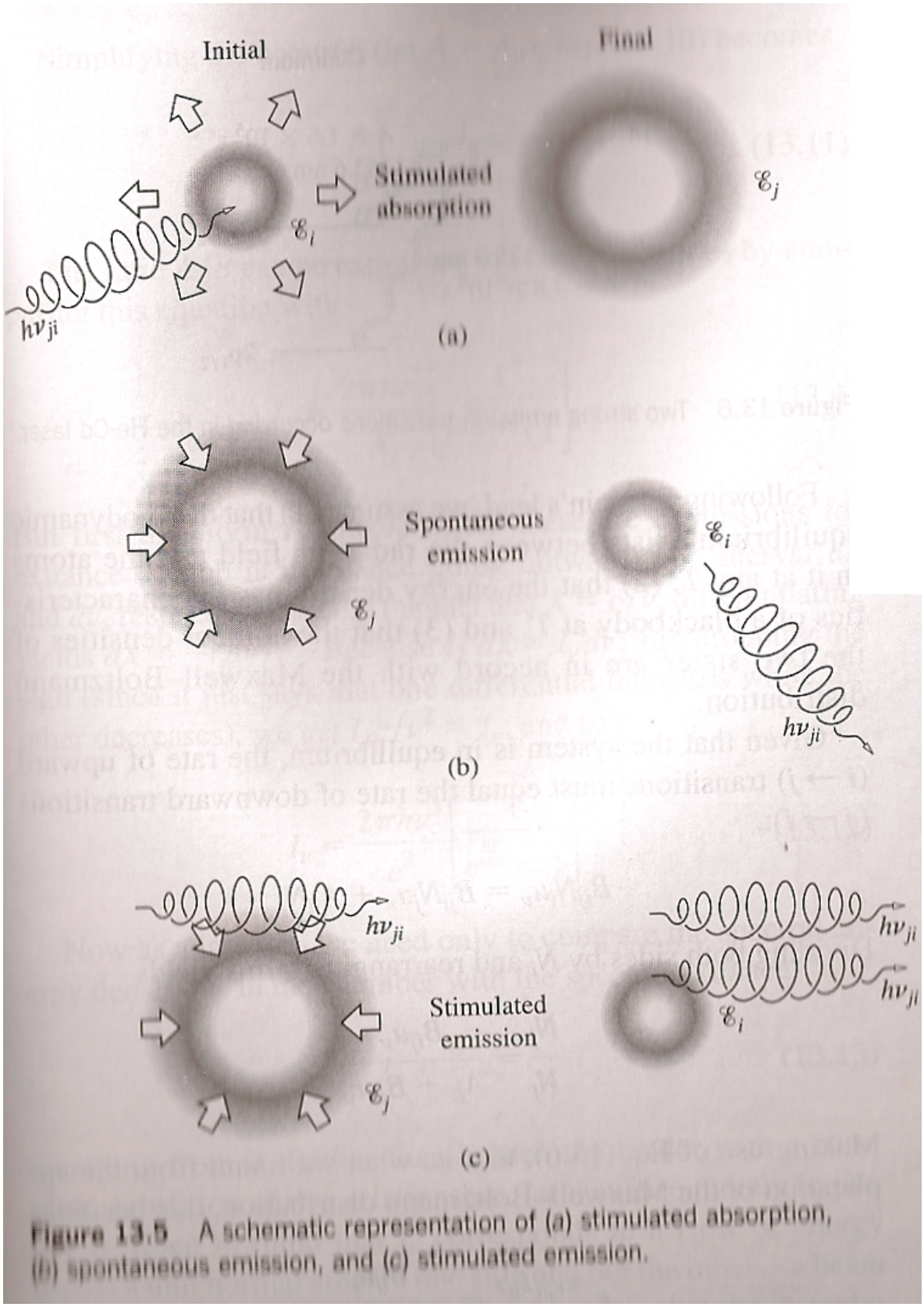


Figure 13.5 A schematic representation of (a) stimulated absorption, (b) spontaneous emission, and (c) stimulated emission.

Le laser (acronyme pour **Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation**) est l'une des plus récentes sources de lumière; les premiers lasers dans le visible ont été mis au point en 1960 (laser solide à rubis) et en 1961 (laser à gaz hélium-néon). Par opposition aux sources usuelles qui créent la lumière par émission spontanée, la source laser met en œuvre un mode de création de lumière par **émission stimulée** (ou induite, prévue par Einstein dès 1917 !). Quand un atome, après absorption d'un photon excitateur passe dans un état excité, il peut spontanément (sans aucune interaction) retomber dans l'état stable. Par contre, si l'électron peut rester suffisamment longtemps dans le niveau supérieur (niveau à longue durée de vie), la désexcitation de l'atome peut être déclenchée par un photon stimulateur dont l'énergie correspond à la transition électronique d'énergie $E_s - E_1 = h f$ (cf. figure ci-contre). La source fournit ainsi deux photons, de même fréquence, de même direction et dont les vibrations correspondantes sont en phase. Une faible partie de l'énergie fournie au laser est transformée en énergie rayonnante : le laser est un convertisseur d'énergie de faible rendement (de 0,1 % à 10 %), le reste de l'énergie est dissipée en chaleur. Cependant l'intérêt du rayonnement laser est immense.

La source laser engendre des ondes électromagnétiques (ou trains d'ondes ou photons), pendant un temps très long par rapport à leur période temporelle ; toutes les ondes émises ont, à une date donnée, même phase en tout point d'une section droite du faisceau. La lumière laser est **monochromatique** (une seule couleur), une seule sorte d'onde. Ces ondes sont bien ordonnées et bien synchronisées : la lumière laser est **cohérente**. Cette propriété des lasers est importante et permet de nombreuses applications : lecteurs de disques compacts, réalisation d'hologrammes, reconstruction 3D de sites historiques, télécommunications, domaine médical ….

Les faisceaux lasers présentent une **très bonne directivité**, leur très faible divergence (inférieur à 10^{-4} rad) permet de les utiliser pour viser des cibles très éloignées (par exemple un réflecteur déposé sur la Lune). La très grande intensité lumineuse, émise pendant une durée donnée, peut être localisée en un très petit volume et y apporter pendant un temps très court, une très grande puissance.

III – L'OPTIQUE GEOMETRIQUE : LES RAYONS LUMINEUX

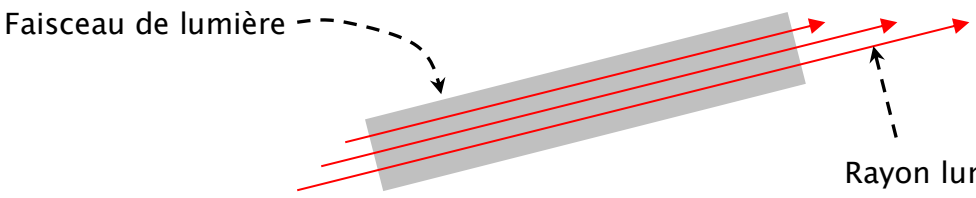
3.1 Introduction

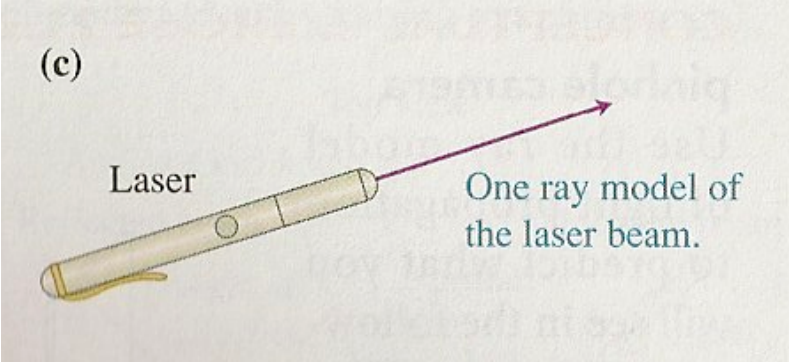
a) Observation de base

Dans de nombreux cas, la lumière se propage en ligne droite.

b) Définition du concept de rayon lumineux (noté RL)

Il s'agit d'une « ligne » qui indique **le sens et la direction de l'écoulement de l'énergie lumineuse**. Le RL est une idée abstraite et n'est pas une entité physique réelle. Une bonne représentation d'un RL est la lumière émise par un LASER. Un faisceau lumineux quelconque est constitué d'une infinité de RL.





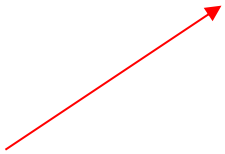
Expérience: Laser + poussière

3.2 Cinq idées de base sur l'optique des rayons lumineux

• Les rayons lumineux se propagent en ligne droite

Dans les milieux matériels, la lumière se propage en **ligne droite** à la vitesse :

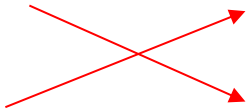
$v = \frac{c}{n}$ où n est **l'indice de réfraction** du milieu (sans unité).



Comme dans les milieux $v < c$ alors $n > 1$. En PTSI, les milieux seront toujours considérés comme **transparents** (ils n'absorbent pas d'énergie) et n sera **uniforme** dans tout le milieu. Ex : le verre ; l'air, l'eau.

• Les rayons lumineux peuvent se croiser

Les rayons lumineux n'interagissent pas entre eux.

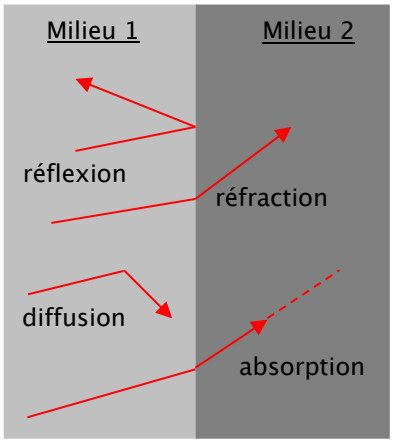


• Un rayon lumineux se propage jusqu'à ce qu'il interagisse avec la matière

Il y a 4 façons d'interagir avec la matière.

→ A l'interface entre deux milieux, il y a **réflexion** et **réfraction**.

→ A l'intérieur d'un milieu, il peut y avoir **diffusion** et **absorption** (hors programme).

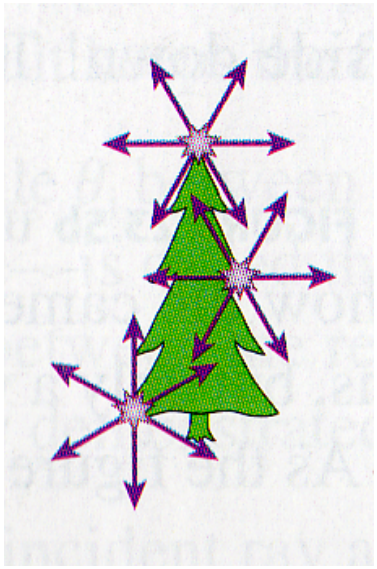


• <u>Un objet est une source de rayons lumineux</u>

→ Un **objet étendu** peut être considéré comme **une infinité d'objets ponctuels**. Chaque point émet des rayons lumineux dans **toutes les directions**.

→ Il existe des **objets primaires**, lumineux par eux-mêmes (le soleil, les lampes…).

→ Il existe des **objets secondaires**, ils réfléchissent la lumière. La plupart des objets sont secondaires. Par la suite, on ne fera pas de distinction entre les objets primaires et les objets secondaires.



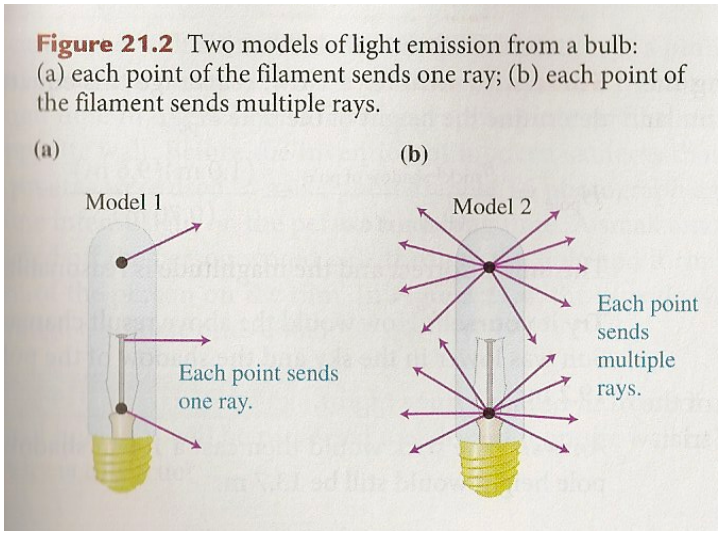


Figure 21.2 Two models of light emission from a bulb: (a) each point of the filament sends one ray; (b) each point of the filament sends multiple rays.

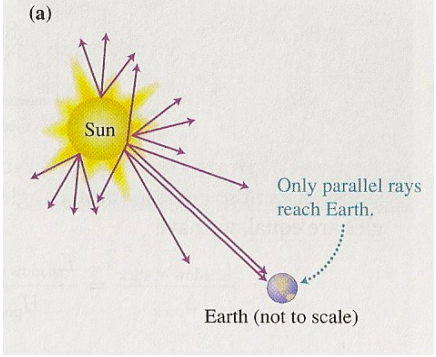
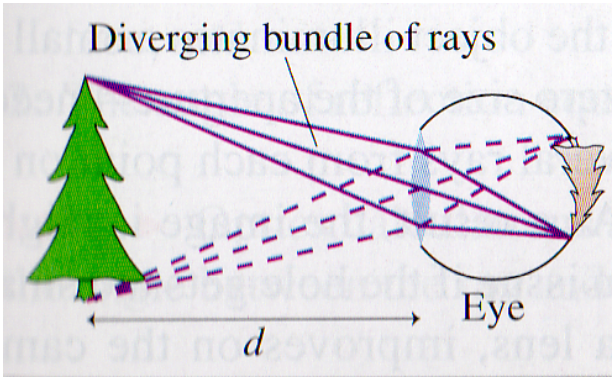


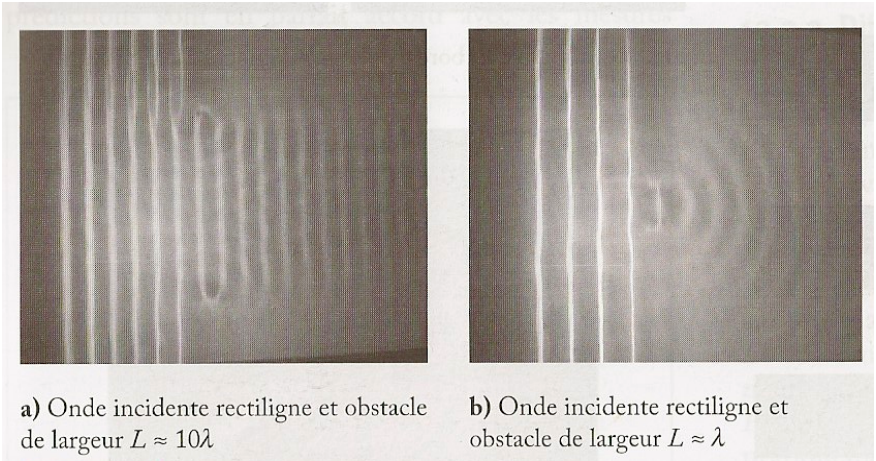
Figure 21.3 Ray models of sunlight and laser light. (a) Only parallel rays of sunlight reach Earth; (b) parallel rays produce sharp shadows; (c) a laser beam can be modeled with one ray of light.

• <u>L'œil « voit » en focalisant un paquet ou faisceau de rayons lumineux divergent (voir la suite du cours sur les lentilles)</u>



3.3 Domaine de validité de l'optique géométrique par rapport à l'optique ondulatoire

Quand la lumière passe à travers une fente fine, elle se répand au-delà de la seule direction rectiligne prévue par l'optique géométrique. Ce phénomène, propre aux ondes (on observe la même chose pour les ondes sonores ou les ondes à la surface de l'eau, cf figure ci-contre), s'appelle la **diffraction** (programme de PT). Ce phénomène est illustré sur les figures ci-dessous



a) Onde incidente rectiligne et obstacle de largeur $L \approx 10\lambda$

b) Onde incidente rectiligne et obstacle de largeur $L \approx \lambda$

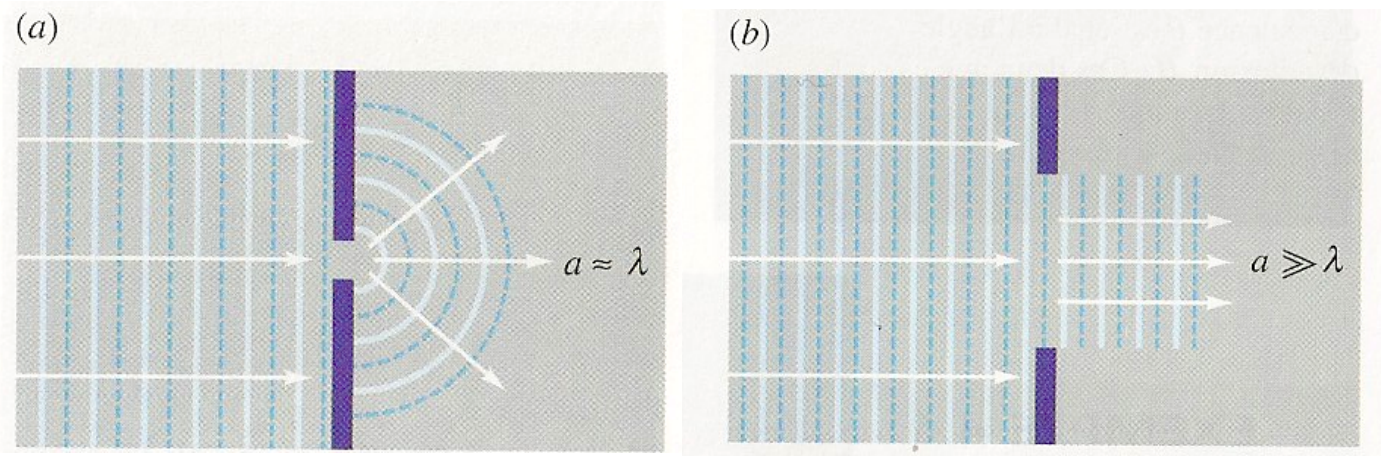


Figure 4.3 ▲
Passage d'une onde de longueur d'onde λ par une ouverture de dimension a. Les fronts d'onde sont représentés en bleu, et les rayons lumineux, en blanc. (*a*) Si $a \approx \lambda$, l'onde se propage dans toutes les directions vers la droite. Le changement de direction des rayons est appelé diffraction. (*b*) Si $a \gg \lambda$, l'onde continue de se propager dans la même direction.

Expérience: diffraction avec un laser

Quand peut-on considérer que l'optique géométrique (propagation rectiligne de la lumière) est un bon modèle pour décrire les phénomènes lumineux ?
Nous retiendrons le critère simple suivant (vous en apprendrez mieux sur le sujet en classe de PT):

L'optique géométrique est valable tant que la taille des obstacles d (lentilles, miroirs, diaphragme…) rencontrés par la lumière est supérieur à sa longueur d'onde λ.

Dans le domaine des longueurs d'ondes visibles, par exemple pour le laser hélium-néon (couleur rouge) $\lambda = 633$ nm. La taille des obstacles rencontrés en optique géométrique, tels que les lentilles, est largement supérieure à $\lambda = 633$ nm. L'optique géométrique est un excellent modèle pour la formation des images (lunettes, télescopes etc…)

IV –LA REFLEXION ET LA REFRACTION (Lois de Snell-Descartes)

Willebrord Snell van Royen ou Snellius, (Leyde, 1580-1626) est un mathématicien et physicien néerlandais. Bien qu'il ait découvert la loi de la réfraction appelée maintenant loi de Snell ou loi de Snell-Descartes en France, il n'en a pas publié le résultat et son exclusivité n'a pas été reconnue jusqu'à ce que Huygens mentionne la découverte de Snell dans son travail environ soixante-dix ans plus tard.

René Descartes, né à La Haye, en Touraine aujourd'hui, dénommé Descartes le 31 mars 1596 et mort à Stockholm dans le palais royal de Suède le 11 février 1650, est un mathématicien, physicien et philosophe français. Il fut le premier à publier les lois de la réflexion et de la réfraction sous leur forme actuelle.

Les lois empiriques de la réflexion et de la réfraction peuvent être interprétées par différents modèles : modèle ondulatoire de Huygens (principe de Huygens), modèle de moindre action de Fermat (Principe de Fermat), modèle de l'onde électromagnétique de Maxwell. Dans ce cours, nous admettrons ces lois comme des faits expérimentaux. Nous verrons seulement en TD une justification de ces lois par le Principe de Fermat.

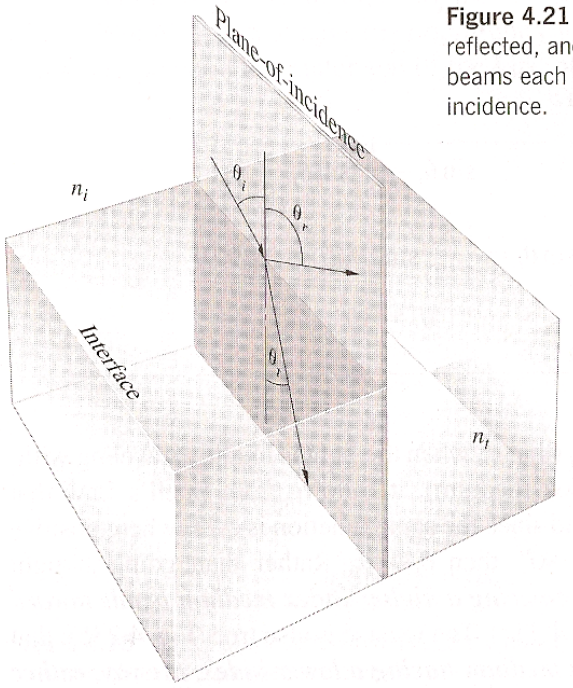


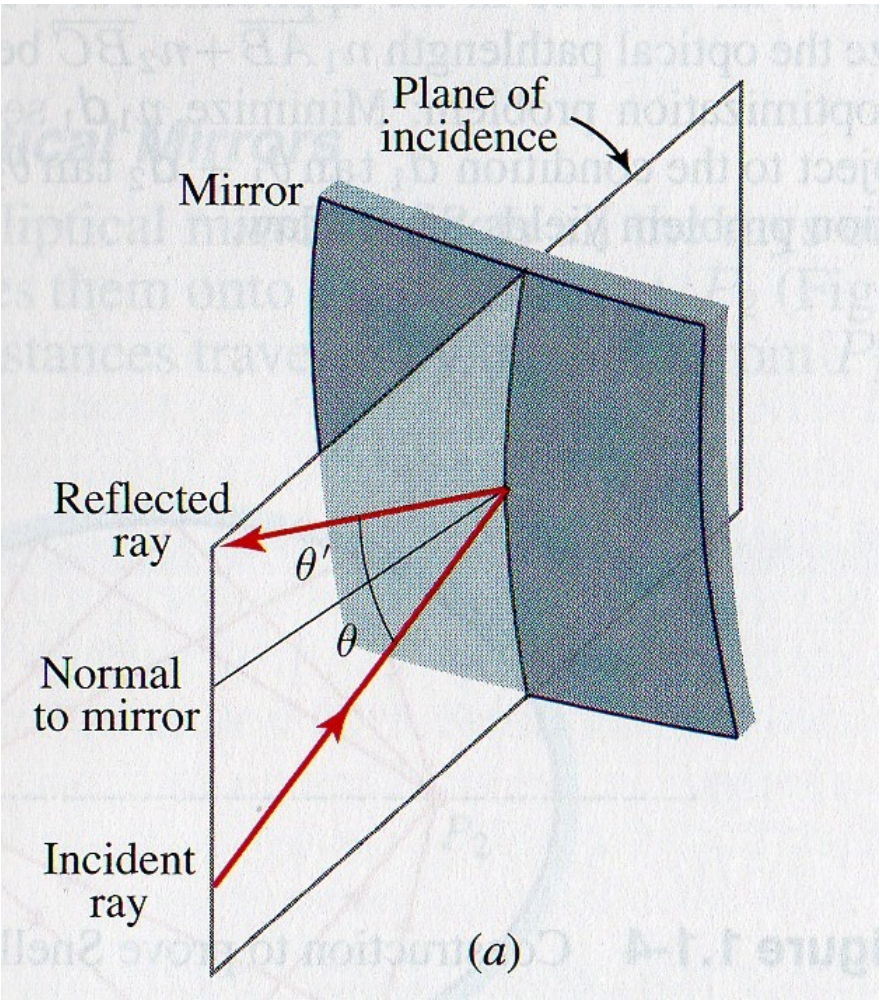
Figure 4.21 The incident, reflected, and transmitted beams each lie in the plane-of-incidence.

4.1 Loi de la réflexion

Loi de la réfléxion :

1 – Le rayon réfléchi est dans le plan d'incidence qui est défini par le rayon incident et la normale (voir figure ci-contre).

2 – L'angle d'incidence θ est égal à l'angle de réflexion θ' (voir figure ci-contre).



Remarques :

- La loi de la réflexion contient deux parties, il ne faut pas oublier la première.
- Les angles d'incidence et de réflexion sont toujours définis par rapport à la normale.
- Lorsque plusieurs rayons lumineux arrivent sur une surface réfléchissante régulière (voir figure ci-dessous), tous les rayons lumineux sont réfléchis dans la même direction. On parle de **réflexion spéculaire**.

Lorsque la surface est irrégulière, chaque rayon lumineux, obéissant à la loi de la réflexion, est réfléchi dans une direction propre. On parle de **réflexion diffuse**.

Un objet secondaire peut être correctement vu par un observateur grâce à la réflexion diffuse, il réfléchit des rayons dans toutes les directions.

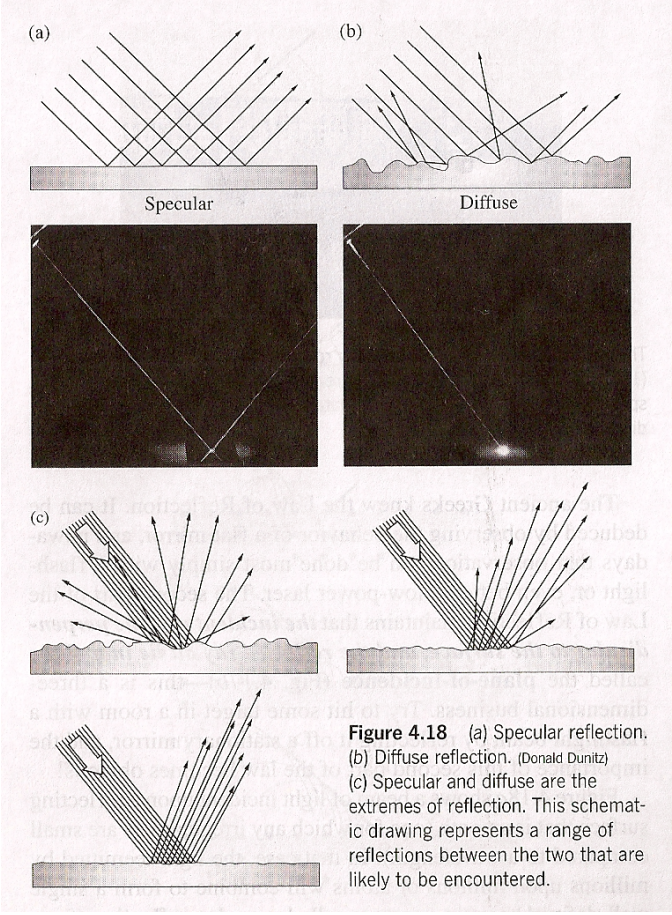
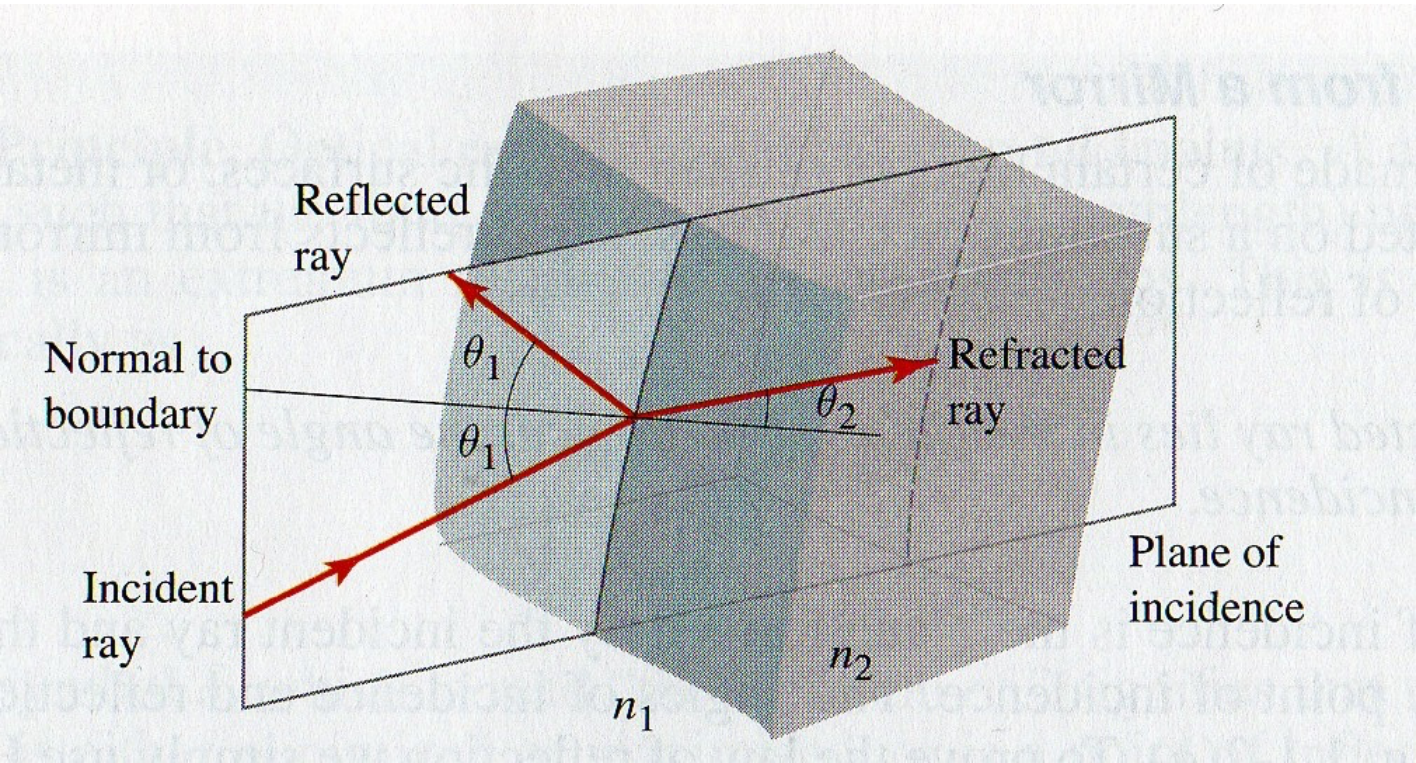


Figure 4.18 (a) Specular reflection. (b) Diffuse reflection. (Donald Dunitz) (c) Specular and diffuse are the extremes of reflection. This schematic drawing represents a range of reflections between the two that are likely to be encountered.

Par contre, si vous lisez un « beau » livre en papier glacé, vous risquez plutôt de voir, suivant l'éclairage, votre reflet par réflexion spéculaire sur la page de papier plutôt que la page elle-même. Il ne faut pas que le papier soit trop lisse pour qu'il soit bien lisible sous n'importe quel éclairage.

4.2 Loi de la réfraction



Loi de la réfraction :

1 – Le rayon réfracté est dans le plan d'incidence qui est défini par le rayon incident et la normale (voir figure ci-contre).

2 – $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$.

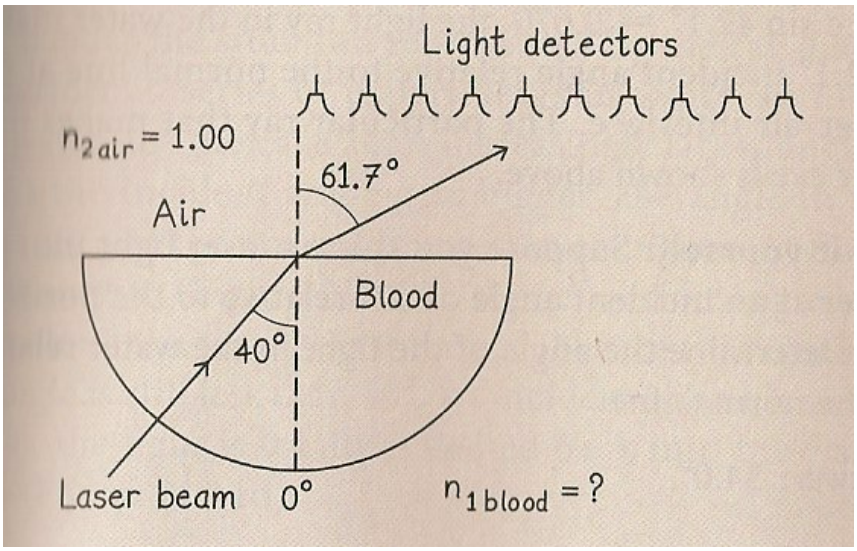
Remarques :

- La loi de la réfraction contient deux parties, il ne faut pas oublier la première.
- Quand $n_2 > n_1$, par exemple milieu 1 = air, milieu 2 = verre, le rayon réfracté se rapproche de la normale et inversement.
- Dans le cas usuel du passage air –verre et dans le cas d'une incidence normale, le rayon réfracté emporte 95% de l'énergie du rayon incident, le rayon réfléchi seulement 5 %. L'optique géométrique ne nous renseigne pas sur la répartition d'énergie entre le rayon réfracté et le rayon réfléchi. Pour selon, il faut utiliser l'approche électromagnétique.

Expérience: réflexion et réfraction, tableau magnétique

Exercice d'application 1 : Concentration du glucose dans le sang

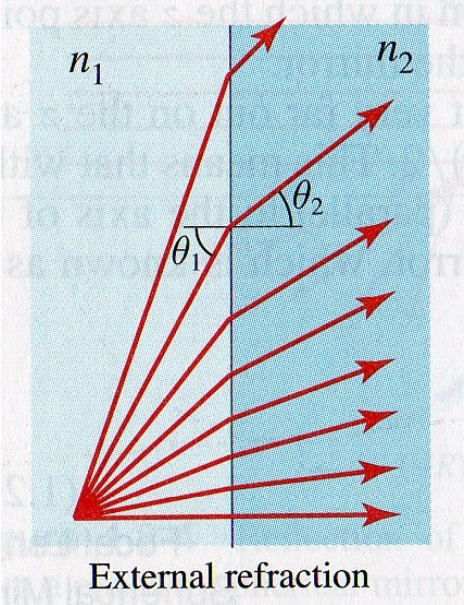
L'indice de réfraction du sang augmente avec sa concentration en glucose (pour une concentration usuelle l'indice est compris entre 1,34 et 1,36). Ainsi mesurer l'indice de réfraction du sang permet de déterminer sa concentration en glucose. On considère donc le dispositif de la figure ci-dessous où du sang est contenu dans un support hémisphérique. Déterminer l'indice de réfraction du sang.



4.3 Réflexion totale interne

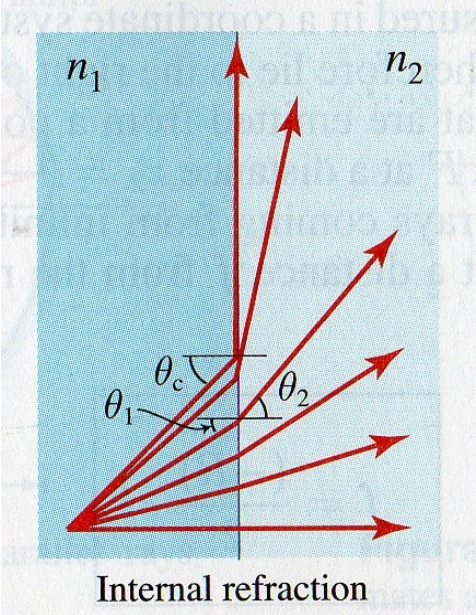
a) Réfraction externe

Le rayon lumineux passe d'un milieu d'indice n_1 à un milieu d'indice n_2 tel que $n_2 > n_1$ (typiquement air → verre). On a toujours, d'après la loi de la réfraction, $\theta_2 < \theta_1$. Quand θ_1 augmente de 0 à $\frac{\pi}{2}$, θ_2 augmente de 0 à $\theta_{2\max} = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\right)$ (voir figure ci-contre).



b) Réfraction interne

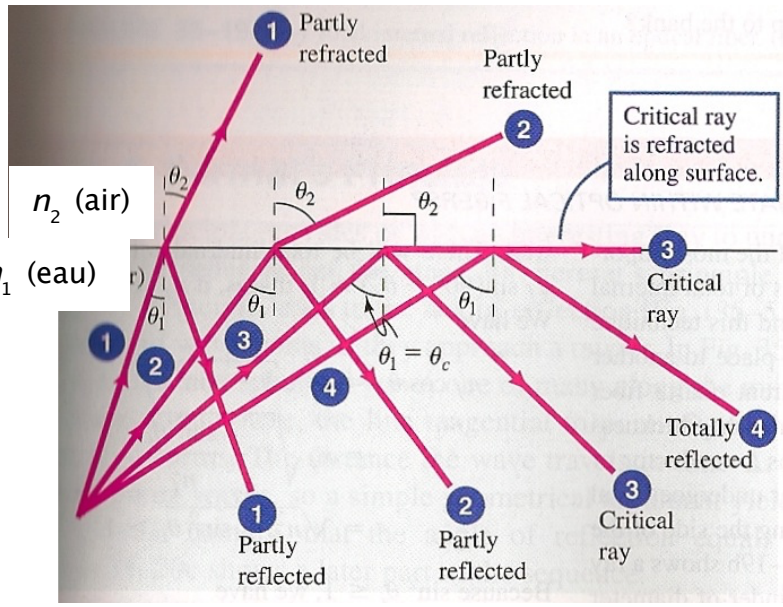
Le rayon lumineux passe maintenant d'un milieu d'indice n_1 à un milieu d'indice n_2 tel que $n_2 < n_1$ (typiquement verre → air). On a toujours, d'après la loi de la réfraction, $\theta_2 > \theta_1$; l'angle de réfraction est à présent supérieur à l'angle d'incidence. Quand θ_1 augmente à partir 0, c'est θ_2 qui va atteindre la valeur de $\frac{\pi}{2}$ en premier (voir figure ci-contre). Cela se produit quand $\theta_1 = \theta_c$, **l'angle critique**. D'après la loi de la réfraction $n_1 \sin\theta_c = n_2 \sin\left(\frac{\pi}{2}\right)$ soit :

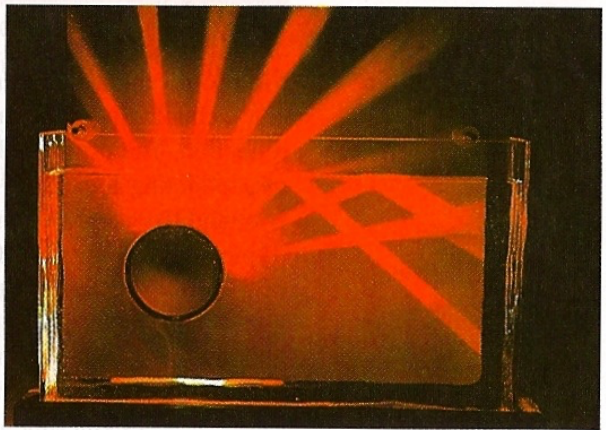


$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

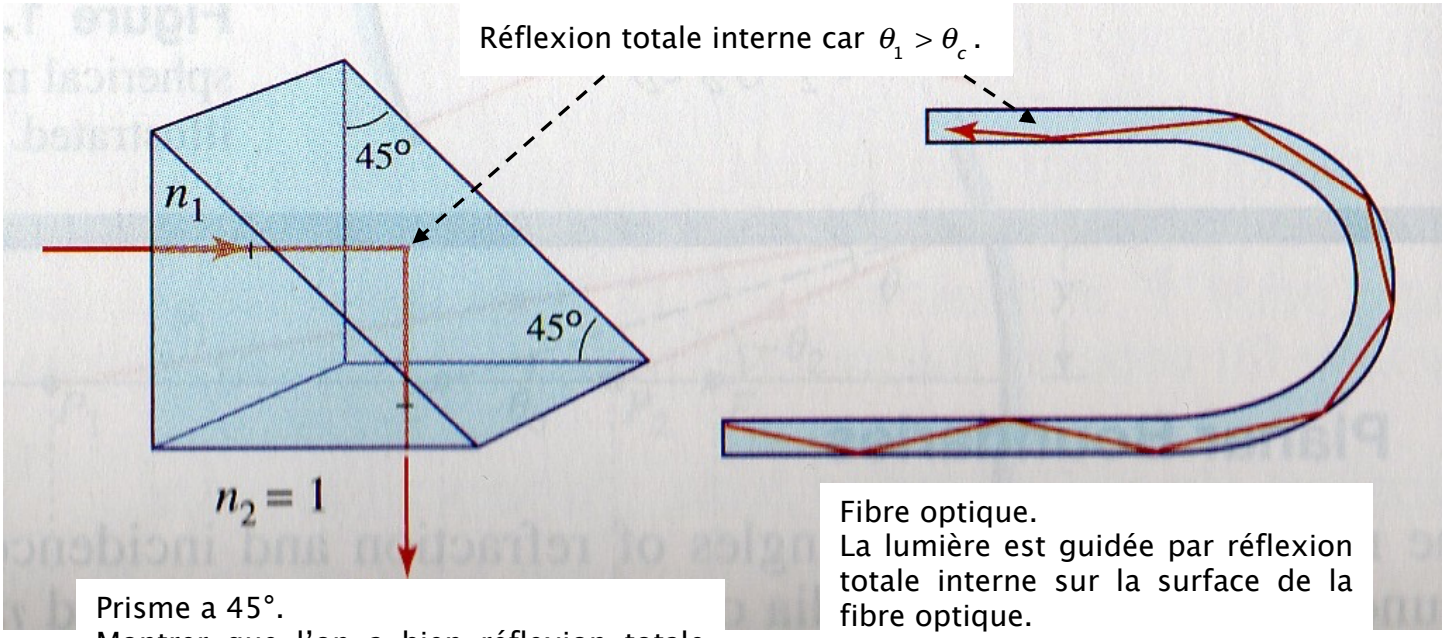
Quand $\theta_1 > \theta_c$, la loi de la réfraction ne peut pas être satisfaite (on doit toujours avoir $-1 \le \sin\theta \le 1$). Le rayon incident est totalement réfléchi, il n'existe plus de rayon réfracté, on parle de **réflexion totale interne**. Par exemple, si $n_2 = 1$ (de l'air) et $n_1 = 1{,}50$ (du verre) alors $\theta_c = 42°$.

La figure ci-dessous donne une autre illustration du phénomène de la réflexion totale interne pour le passage eau-air.





Ce phénomène est à la base de nombreux systèmes optiques (figure ci-dessous) qui ont pour but de guider la lumière d'un point à un autre, sans perte d'énergie à cause des rayons réfractés, comme les prismes ou les fibres optiques (voir paragraphe suivant).



Prisme a 45°.
Montrer que l'on a bien réflexion totale interne si $n_1 > \sqrt{2}$.

Fibre optique.
La lumière est guidée par réflexion totale interne sur la surface de la fibre optique.

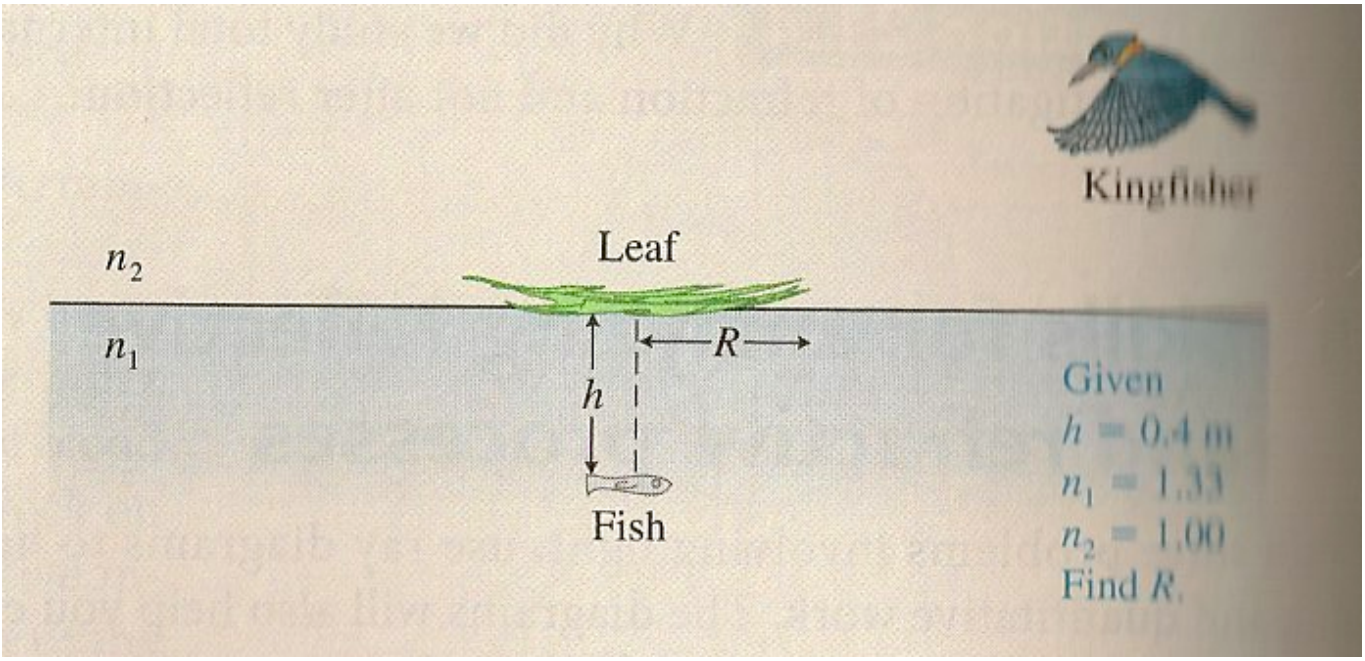
c) Principe du retour inverse de la lumière

Revenons sur le cas du paragraphe a). Le rayon lumineux passe d'un milieu d'indice n_1, avec un angle incident θ_1, à un milieu d'indice n_2 avec un angle de réfraction θ_2. On a toujours $n_2 > n_1$ (typiquement air → verre). Maintenant, si le rayon vient du milieu d'indice n_2 avec un angle incident θ_2, **le principe du retour inverse de la lumière** nous dit que l'angle de réfraction vaut θ_1. L'angle

$\theta_{2max} = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\right)$ correspond à présent à l'angle critique θ_c pour cette nouvelle situation, passage de $n_2 \rightarrow n_1$ conformément à ce qui a été vu au paragraphe b) pour la réflexion totale interne (il suffit d'inverser les indices).

Exercice d'application 2 : Se cacher !

Un poisson sous la menace d'un oiseau prédateur se cache sous une feuille. Quelle doit-être le rayon de la feuille (cf. figure ci-dessous) pour que l'oiseau ne puisse jamais voir le poisson quelque soit sa position au dessus de l'eau ?



Exercice d'application 3: Fibre optique, angle d'acceptance et ouverture numérique (explicitement au programme)

Les fibres optiques permettent de guider la lumière d'un point à un autre. Elles sont utilisées de façon intensive dans les télécommunications (réseau internet). Plusieurs milliers de kilomètres de fibres optiques reposent au fond des océans. On considère la fibre optique simple, dite à saut d'indice, suivante (vue en coupe):

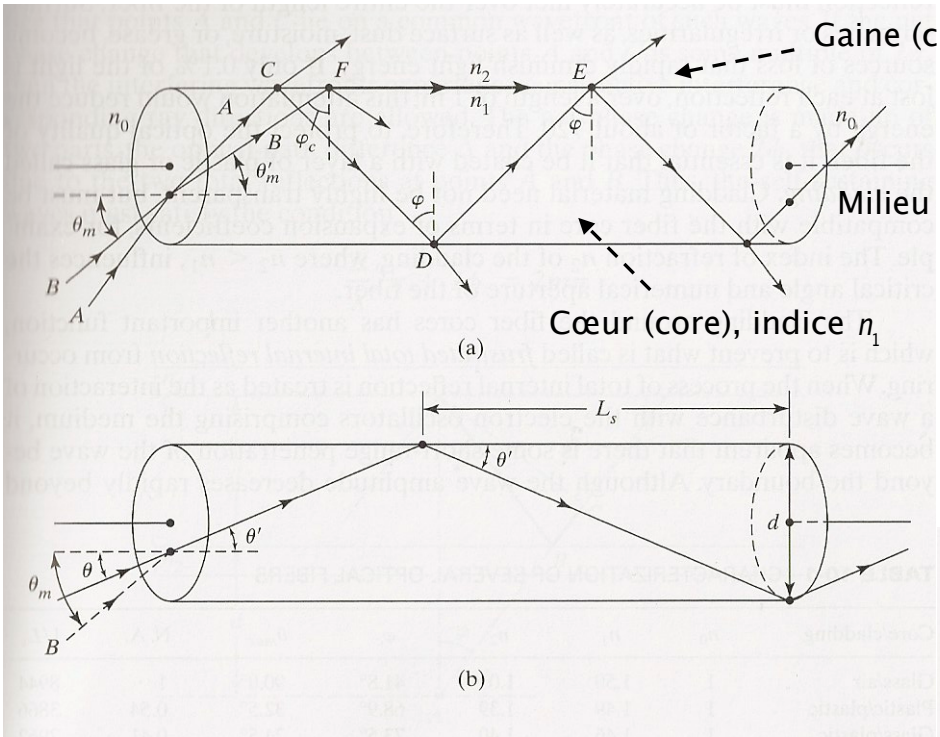


Figure 10-3 (a) Propagation of light rays through an optical fiber. Ray *B* defines the maximum input cone of rays satisfying total internal reflection at the walls of the fiber. (b) Propagation of a typical light ray through an optical fiber.

a) Déterminez le demi-angle θ_m du cône dans lequel nous devons « envoyer » la lumière pour que cette dernière soit guidée dans la fibre. En déduire l'expression de ***l'Ouverture Numérique*** de la fibre (Numerical Aperture) défini par $\text{O.N} \equiv n_o \sin\theta_m$ en fonction des seuls indices optique n_1 et n_2.

b) On considère un rayon lumineux qui rentre avec un angle $\theta < \theta_m$ dans la fibre. Il s'agit d'un ***mode de propagation***. Après avoir exprimé L_s, déterminez le nombre de réflexions de ce mode dans une fibre optique de longueur 1 m. On prendra $n_o = 1$, $n_1 = 1{,}60$, $\theta = 30^\circ$ et $d = 50\ \mu$m.

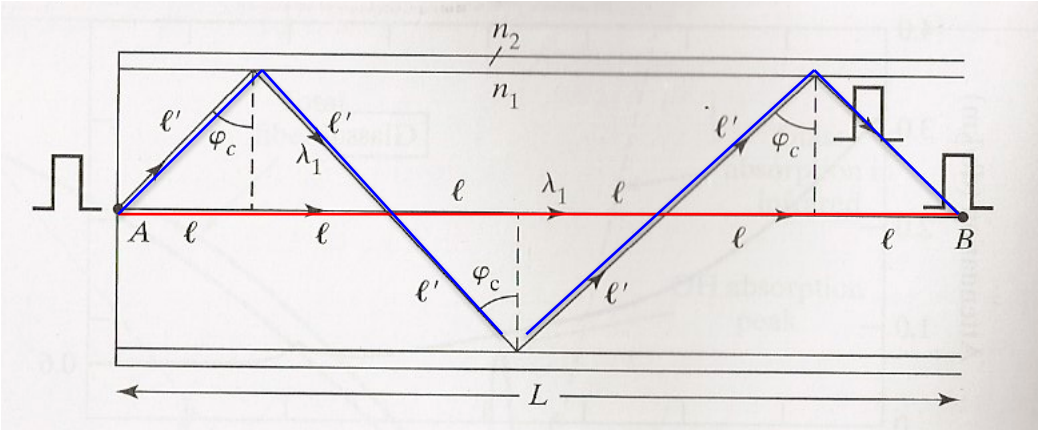
TABLE 10-1 CHARACTERIZATION OF SEVERAL OPTICAL FIBERS

Core/cladding	n_0	n_1	n_2	φ_c	θ_{max}	N. A.	$1/L_s$
Glass/air	1	1.50	1.0	41.8°	90.0°	1	8944
Plastic/plastic	1	1.49	1.39	68.9°	32.5°	0.54	3866
Glass/plastic	1	1.46	1.40	73.5°	24.5°	0.41	2962
Glass/glass	1	1.48	1.46	80.6°	14.0°	0.24	1657

Note: The reciprocal of the skip distance ($1/L_s$, or skips per meter) is calculated for a fiber of diameter 100 μm and at $\theta_i = \theta_{\max}$.

V – FIBRE OPTIQUE ET DISPERION INTERMODALE

La fibre optique de l'exercice précédent de longueur L est éclairée par un faisceau conique de demi-angle au sommet θ_m composé de rayons lumineux couvrant l'ensemble des valeurs d'angle d'incidence compris entre $0 < \theta < \theta_m$ (cf. schéma ci-dessous).



Les deux rayons extrêmes parcourent la fibre en des temps différents :

✓ Le rayon lumineux qui traverse le plus rapidement la fibre optique correspond au rayon incident parallèle à l'axe de la fibre, c'est-à-dire présentant un angle d'incidence $\theta = 0$ au niveau de l'entrée de la fibre. Ce rayon parcours une distance L.

✓ Le rayon lumineux qui met le plus de temps à traverser la fibre optique est le rayon d'angle d'incidence θ_m à l'entrée de la fibre. Ce rayon parcours une distance L'.

Nous allons déterminer la différence de temps de parcours de ces deux rayons dans la fibre. D'après la géométrie de la figure :

$$\sin\varphi_c = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\ell}{\ell'} = \frac{L}{L'}$$

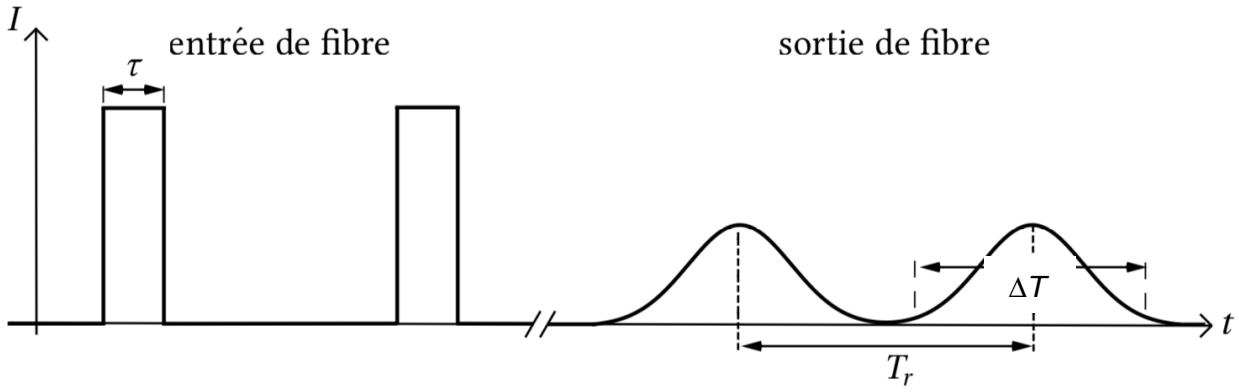
La différence de temps de parcours des deux rayons diffère de l'intervalle de temps ΔT donné par :

$$\Delta T \equiv T_{\max} - T_{\min} = \frac{L'}{v} - \frac{L}{v} = \frac{L}{v}\left(\frac{n_1}{n_2} - 1\right)$$

Comme $v = c/n_1$, on en déduit :

$$\boxed{\Delta T = \frac{L}{c} n_1 \left(\frac{n_1 - n_2}{n_2}\right)}$$

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. La différence de temps de propagation entre les différents rayons lumineux composant le faisceau incident sur la fibre optique conduit à un étalement temporel des impulsions lumineuses. Comme $\tau \ll \Delta T$, la durée d'une impulsion en sortie de la fibre est donnée par ΔT correspondant à la différence de temps de parcours entre les rayons extrêmes, c'est-à-dire le rayon le plus rapide $\theta = 0$ et celui dont la durée de parcours est la plus longue $\theta = \theta_m$.



Le phénomène d'étalement temporel des impulsions lumineuses lors de la propagation dans une fibre optique est appelé ***dispersion intermodale***. Ce phénomène est dû à la différence de temps de propagation entre les différents rayons lumineux compris dans le cône d'acceptance de la fibre. Pour éviter que deux impulsions successives ne se superposent en sortie de fibre, il faut que la durée entre deux impulsions soit supérieure à la durée d'une impulsion en sortie de fibre soit :

$$T_{r\,\min} \gg \Delta T$$

Si par exemple, $n_1 = 1{,}46$ et $n_2 = 1{,}45$, la dispersion intermodale par km de fibre optique vaut :

$$\Delta\left(\frac{T}{L}\right) = \frac{1{,}46}{3\times10^8}\left(\frac{1{,}46-1{,}45}{1{,}45}\right) = 3{,}4\times10^{-11}\ \text{s.m}^{-1} = 34\ \text{ps.m}^{-1}.$$

Une impulsion représente un bit d'information. On en déduit le débit maximal de la fibre: $D_{\max} = 1/T_{r\,\min}$ soit un débit de 3×10^2 kbits.s^{-1}

VI – DISPERSION

Dans un milieu transparent et homogène (eau, air, verre…), l'indice de réfraction n dépend de la longueur d'onde dans le vide λ_0 :

→ Dans le vide: $\lambda_0 = cT$

→ Dans un milieu transparent homogène: $\lambda = vT = \dfrac{c}{n}T$

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

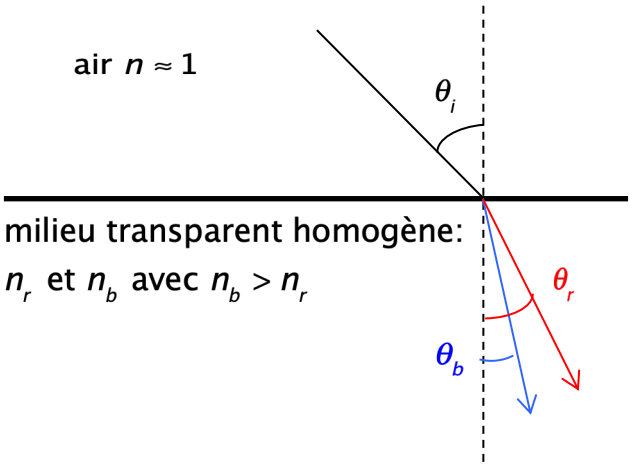
Dans de nombreux milieux transparents homogènes, on a la relation suivante pour le visible :

$$n = A + B\,\omega^2 = A' + \frac{B'}{\lambda_0^{\,2}} \quad \left(\omega = 2\pi c/\lambda\right),$$

avec A et B des constantes qui dépendent du type de matériaux. Comme $\lambda_{0\ \text{violet}} < \lambda_{0\ \text{rouge}} \rightarrow n_{\text{violet}} > n_{\text{rouge}} \rightarrow v_{\text{violet}} < v_{\text{rouge}}$. Cela permet d'expliquer la dispersion de la lumière à travers un prisme, c'est-à-dire la séparation des différentes longueurs d'onde (couleurs) de la lumière blanche.

A l'interface entre l'air et un milieu transparent homogène, il faut appliquer la loi de la réfraction pour chaque longueur d'onde :

$$\left.\begin{aligned}\sin\theta_r &= \frac{\sin\theta_i}{n_r}\\ \sin\theta_b &= \frac{\sin\theta_i}{n_b}\end{aligned}\right\} \Rightarrow \theta_r > \theta_b$$



Ainsi le bleu et le rouge pénètrent dans le milieu avec des angles différents, il y a séparation des longueurs d'onde (des couleurs), c'est la dispersion.

La figure ci-dessous donne l'évolution de l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde pour différents matériaux transparents et homogènes.

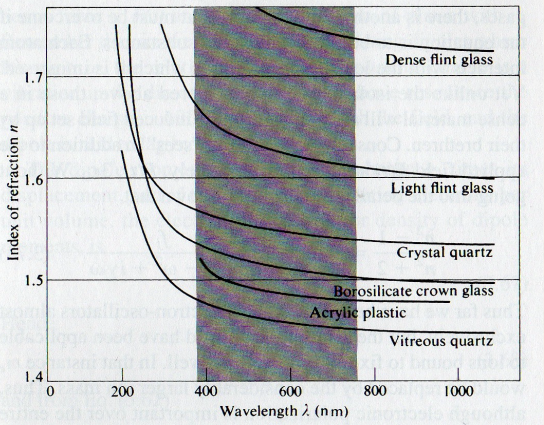


Figure 3.40 The wavelength dependence of the index of refraction for various materials.

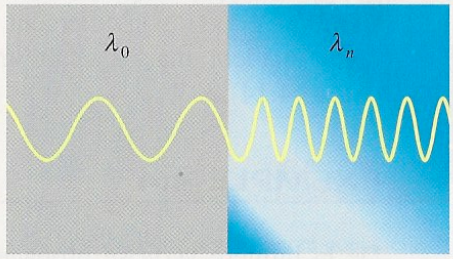
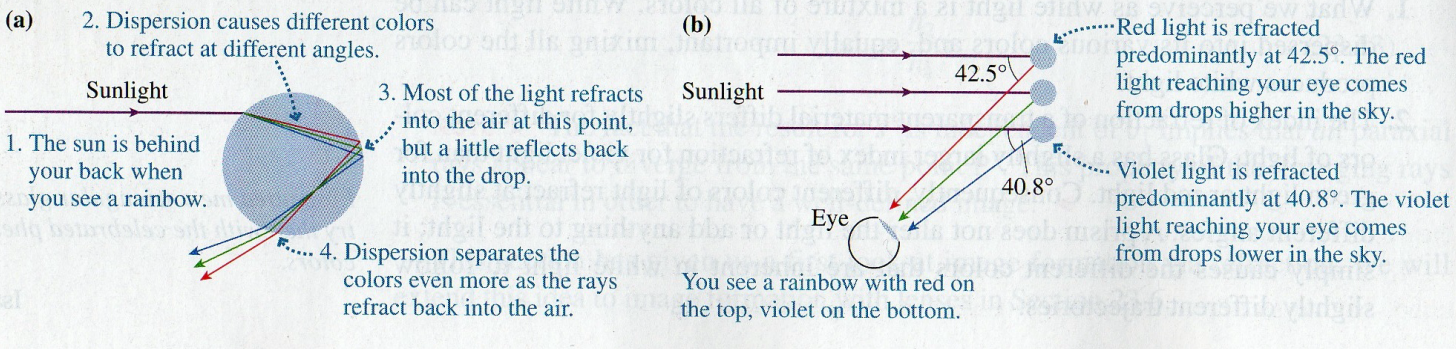


Figure 4.13 ▲
La longueur d'onde de la lumière dans un milieu d'indice n est inférieure à sa longueur d'onde dans le vide : $\lambda_n = \lambda_0/n$. La fréquence de la lumière ne change pas au passage d'un milieu à un autre, car elle est déterminée par la source.

Un matériau sera plus ou moins dispersif si n varie plus ou moins avec la longueur d'onde.
C'est ce phénomène de dispersion qui explique la formation des arcs-en-ciel. La lumière du soleil est dispersée grâce aux gouttes d'eau liquide en suspension dans l'atmosphère (après une pluie).
Cela est illustré sur la figure ci-dessous (pour votre culture):

FIGURE 23.30 Light seen in a rainbow has undergone refraction + reflection + refraction in a raindrop.

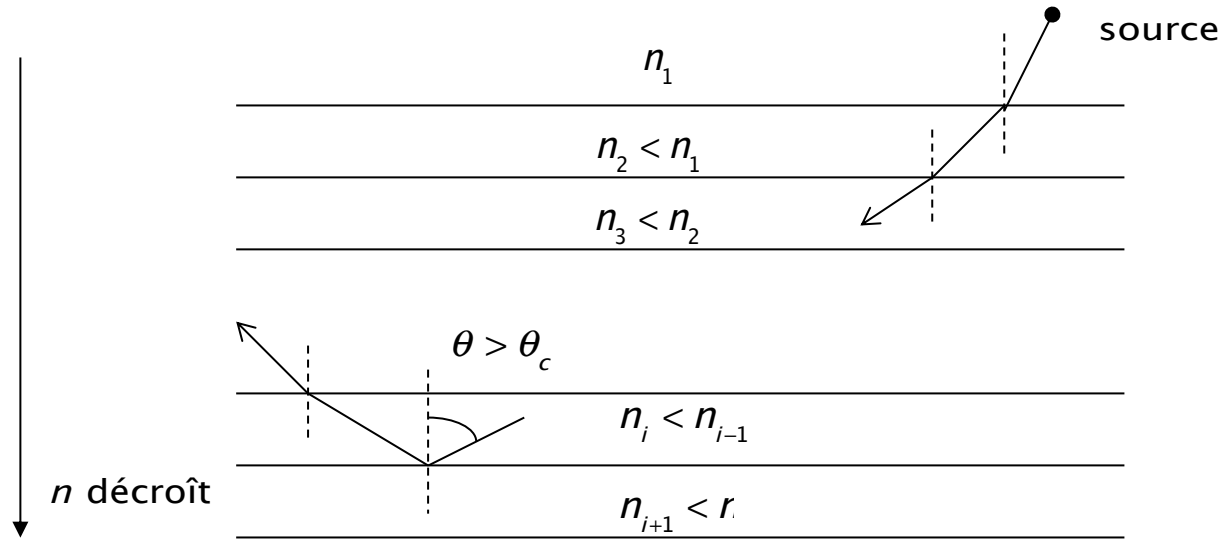


Arc en ciel au camping de Valbonnais dans l'Oisans (Ecrins) (photo prise le 14 août 2024).

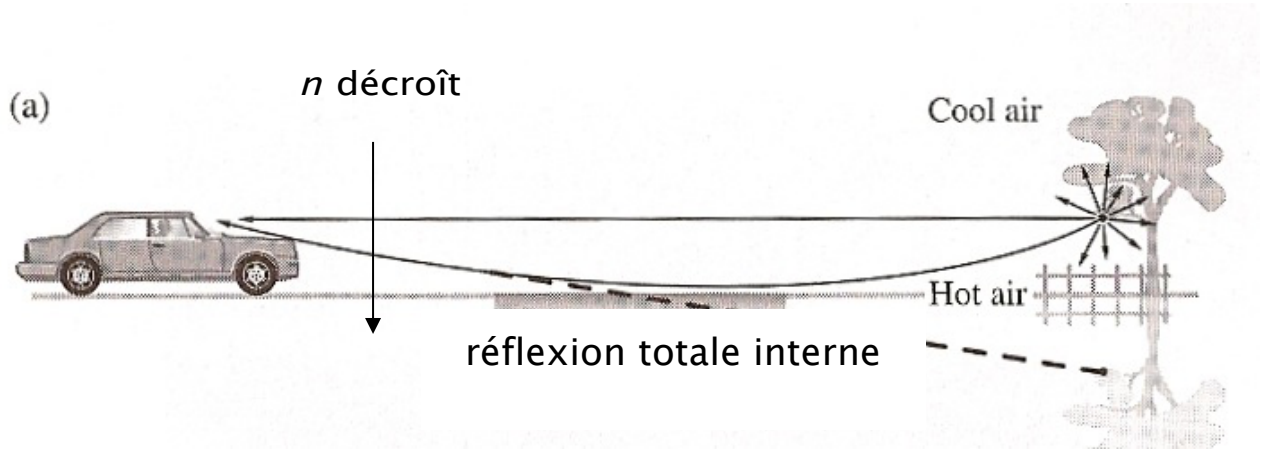
Très bel arc circumhorizontal ou halo (photos prise sur la plateau de la Molière dans le Vercors le 9 janvier 2021). https://fr.wikipedia.org/wiki/Arc_circumhorizontal.

VIII – QUELQUES MOTS SUR LES MIRAGES

Que se passe-t-il quand l'indice de réfraction n d'un milieu varie de façon continue dans l'espace ? On peut en première approximation modéliser ce milieu par un empilement de milieux d'indice de réfraction constant.



Si dans un milieu n augmente progressivement de bas en haut, un rayon lumineux aura une trajectoire courbe. Ceci explique le phénomène des mirages. Considérons la figure ci dessous :



on assimile l'air à un gaz parfait donc $PV = nRT$ (avec dans cette relation n le nombre de moles et pas l'indice de réfraction).

On peut montrer que pour un gaz $(n-1)\alpha\rho$ avec $\rho = \frac{m}{V}$ la masse volumique. En effet, plus un milieu est dense et plus en général l'indice de réfraction n est important, la lumière se propage plus lentement dans un milieu plus dense. Sur une route, par une chaude journée, l'air est plus chaud au niveau de la route. Comme $T = \frac{PV}{nR} = \frac{MPV}{mR} = \frac{PM}{\rho R} \Rightarrow (n-1)\alpha\frac{1}{T}$. Ainsi n est plus faible au niveau de la route, l'air étant plus chaud, il est moins dense.

Ainsi les rayons lumineux ne se propagent plus en ligne droite. Sur la figure ci-dessus, un observateur qui regarde la route voit un arbre « sous la route ». En effet, le cerveau est trompé, il croit toujours que la lumière se propage en ligne droite.

Souvent, il nous semble voir sur la route une flaque d'eau quand il fait chaud. En réalité, cette flaque d'eau correspond au ciel, les rayons étant courbés: c'est la lumière du ciel qui arrive dans nos yeux, comme avec l'exemple précédent de l'arbre.

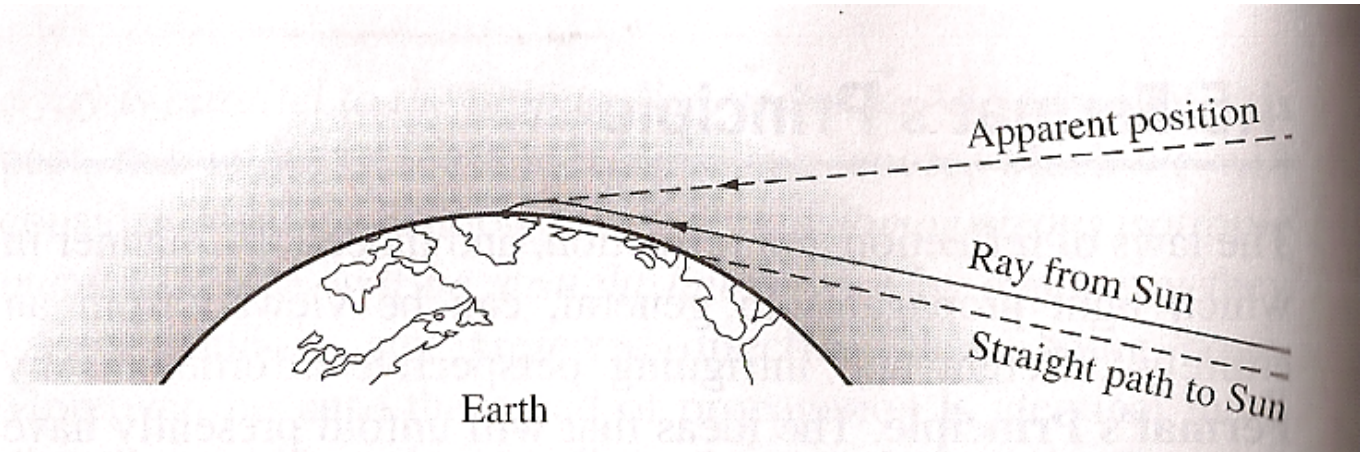


Figure 4.38 The bending of rays through inhomogeneous media. Because the rays bend as they pass through the atmosphere the Sun appears higher in the sky.