
Chapitre 1

Bases de l'optique géométrique

I. Nature ondulatoire de la lumière

1. La lumière : une onde électromagnétique (OEM)
2. Onde électromagnétique sinusoïdale
3. Spectre d'une OEM

II. Sources de lumière

1. Source lumineuse
2. Lampe spectrale
3. Rayonnement thermique
4. Les lasers

III. Propagation de la lumière dans un milieu transparent

1. Indice optique d'un milieu transparent

2. Relation entre λ et λ_0

IV. Bases de l'optique géométrique

1. Approximation de l'optique géométrique
2. Propriétés des rayons lumineux

V. Changement de milieu : lois de Snell -Descartes

1. Phénomènes de réfraction et réflexion
2. Enoncé des lois

VI. Réflexion totale

1. Mise en évidence
2. Conditions de réflexion totale
3. Application de la réflexion totale : la fibre optique à saut d'indice



" Quand l'eau courbe un bâton, ma raison le redresse. "

Jean de La Fontaine



Un peu d'histoire...

La lumière inspire le physicien comme l'ingénieur

La lumière a provoqué maintes révolutions scientifiques et reste le sujet d'étude de prédilection des physiciens. Elle est aussi un outil sans limite pour l'ingénieur : lasers et communications optiques ont changé nos vies.

« C'est la nuit qu'il est beau de croire à la lumière ! »

Grande était l'émotion de la délégation française aux cérémonies Nobel de 1997, quand Claude Cohen-Tannoudji cita Chantecler, le coq d'Édmond Rostand qui attend le lever du soleil avec confiance, pour évoquer l'alliance, autour de la lumière, entre la science et l'humanisme. Célébrée par les peintres, les écrivains et les poètes, la lumière symbolise la beauté, la pureté, et même un phénomène divin. Plus que jamais, elle offre des perspectives qui, comme le montre ce Dossier sur la lumière au début du **XXI^e** siècle, font rêver le physicien autant que l'ingénieur : la lumière est un sujet d'étude fécond pour le physicien, au cœur des progrès de la physique quantique ; la panoplie des applications de l'optique, sans lesquelles nous n'aurions pas basculé dans la société de l'information et de la communication, s'enrichit chaque jour.

La nature de la lumière

Mais en quelle lumière faut-il croire ? Tout en progressant en optique, à partir des lunettes de presbytes du Moyen Âge, les hommes ont longtemps débattu sur sa nature. Au **XVII^e** siècle s'est engagé le grand débat qui occupa les physiciens pendant près de trois siècles : la lumière est-elle une onde ou un flux de corpuscules ?

Pour expliquer les lois de la réflexion et de la réfraction des rayons lumineux, René Descartes invoque des corpuscules qui rebondissent sur un miroir comme une balle sur un terrain de jeu de paume, et dont la vitesse change lorsqu'ils pénètrent dans un milieu transparent, l'eau ou le verre. Quelques décennies plus tard, Isaac Newton développe en grand détail son modèle corpusculaire de la lumière. Il n'hésite pas à le compliquer à l'extrême pour le rendre compatible avec ses remarquables observations des « anneaux de Newton », dont nous savons aujourd'hui qu'ils sont un phénomène ondulatoire. En réaction, Christiaan Huygens développe, par analogie avec les ondes que l'on observe à la surface de l'eau, un modèle ondulatoire de la lumière, qui lui permet d'interpréter de façon élégante les phénomènes de réflexion et de réfraction.

Toutefois le débat est vite bloqué par Newton : fort de ses succès expérimentaux en optique, et de l'extraordinaire prestige acquis, à juste titre, par sa loi de la gravitation universelle qui lui permet de décrire dans les moindres détails les mouvements des planètes, il use - et abuse - de son autorité pour imposer sa théorie corpusculaire de la lumière. Avec le recul, on est moins impressionné par l'optique de Newton que par sa mécanique, avec néanmoins, il faut le reconnaître, des exceptions majeures. Ses expériences sur la décomposition de la lumière blanche et leur interprétation restent un modèle de démarche scientifique pour les physiciens modernes. Son télescope à miroir, encore utilisé aujourd'hui sous le nom de télescope de Newton, a fait progresser les observations astronomiques en les affranchissant des aberrations chromatiques des lunettes.

Il faut donc attendre les travaux de Thomas Young en Angleterre et d'Augustin Fresnel en France pour que soit établie de façon incontestable, au début du **XIX^e** siècle, la supériorité du modèle ondulatoire pour expliquer les phénomènes d'interférences ou de diffraction. Aujourd'hui encore, on est ébloui à la lecture du mémoire de Fresnel, tellement convaincant que l'Académie des sciences, jusque-là favorable à Newton, bascule en bloc en faveur du modèle ondulatoire. C'est une construction intellectuelle magnifique, qui le conduit à décrire la lumière comme une vibration transversale, dont il établit toutes les propriétés alors même qu'il en ignore la nature.

Celle-ci ne sera élucidée que 50 ans plus tard : James Clerk Maxwell écrit des équations pour synthétiser les connaissances de l'époque sur l'électricité et le magnétisme. Une solution de ces équations est une onde électroma-

gnétique formée d'un champ électrique et d'un champ magnétique vibrant transversalement, se propageant dans le vide à la vitesse de 300 000 kilomètres par seconde. La coïncidence de cette valeur théorique avec le résultat des mesures de la vitesse de la lumière ne peut être le fait du hasard. Plus personne ne doute que la lumière soit une onde électromagnétique.

Après le triomphe du modèle électromagnétique de Maxwell, la lumière reste au centre des progrès de la physique. Elle déclenche la révolution quantique avec l'article fondateur de Max Planck en 1900. Pour expliquer la composition spectrale (la distribution des couleurs) de la lumière émise par un corps porté à haute température, le grand savant émet l'hypothèse de la *quantification des échanges d'énergie entre lumière et matière*. Les échanges d'énergie ne s'effectuent que par multiples entiers d'une quantité indivisible $E = h\nu$, relation dans laquelle ν est la fréquence de la lumière (qui caractérise sa couleur), et h une nouvelle constante de la physique, aujourd'hui appelée constante de Planck, et qui intervient dans toute la physique quantique.

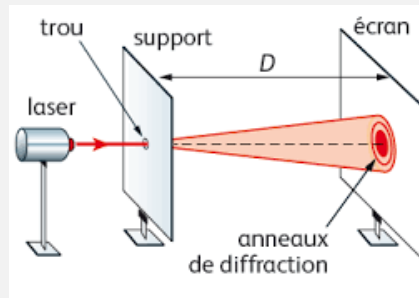
Albert Einstein va beaucoup plus loin en 1905 en faisant l'hypothèse que la lumière elle-même est quantifiée, formée de grains d'énergie $E = h\nu$, qui se comportent comme des corpuscules relativistes, que l'on appellera plus tard *photons*. Dès 1909, alors que son hypothèse des quanta de lumière n'a pas encore convaincu ses collègues à cause de la difficulté à la réconcilier avec le modèle ondulatoire électromagnétique, Einstein a déjà accompli le saut intellectuel qui le mène à la conclusion que la lumière est à la fois une onde et un corpuscule. En 1923, Louis de Broglie généralise à la matière cette dualité, conjecturant qu'un corpuscule tel qu'un électron est aussi une onde. Il signe ainsi l'acte de naissance de la mécanique ondulatoire, première version de la mécanique quantique moderne.

Alain Aspet, Dossier pour la science n° 53, 1^{er} octobre 2006

I. Nature ondulatoire de la lumière

1. La lumière : une onde électromagnétique (OEM)

Expérience de diffraction : On intercepte un faisceau laser par un trou de diamètre variable. On ferme progressivement le trou.



Avec un trou de grand diamètre, on observe un spot lumineux sur l'écran mais si on diminue le diamètre du trou, on observe un phénomène de diffraction.

Les phénomènes d'interférences et de diffraction des ondes lumineuses prouvent le caractère ondulatoire de la lumière.

Une OEM est un phénomène de propagation d'un champ électrique $\vec{E}$ et d'un champ magnétique $\vec{B}$. Les équations de Maxwell décrivent l'évolution et l'interdépendance de ces champs.

Comme tous les types d'ondes, une OEM se propage de proche en proche avec un transfert d'énergie sans transport de matière, à partir de la source dans toutes les directions qui lui sont offertes.

La lumière se propage dans le vide avec une célérité $c = 299792458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

La vitesse de propagation d'une OEM est une propriété du milieu et peut dépendre de la fréquence de l'onde si le milieu est dispersif.

2. Onde électromagnétique sinusoïdale

Une onde électromagnétique sinusoïdale de fréquence donnée est dite monochromatique. Elle est caractérisée par sa période (temporelle) T et sa fréquence f , parfois notée avec la lettre grecque «nu» ν : $f = \frac{1}{T}$. **Ces grandeurs ne dépendent pas du milieu de propagation.**

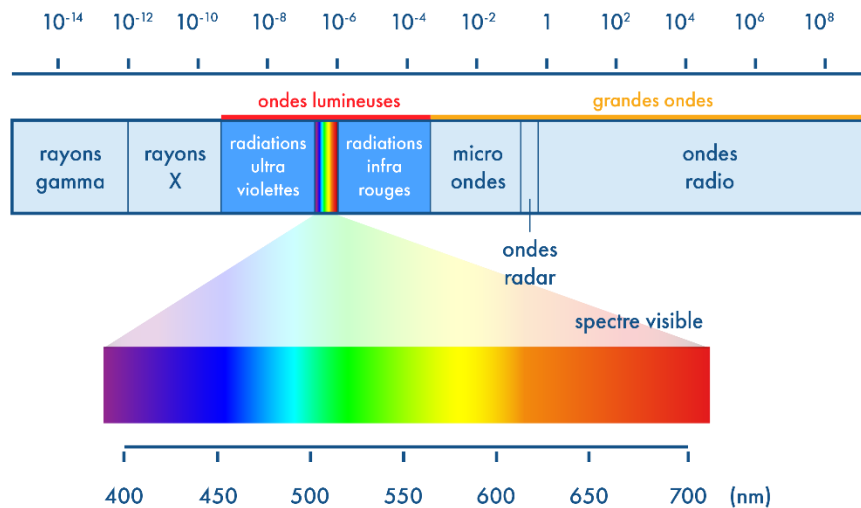
La longueur d'onde λ est donnée par la relation $\lambda = v T$ où v est la vitesse de propagation, ou célérité, de l'OEM. **Elle dépend du milieu de propagation** : une OEM sinusoïdale de fréquence f se propageant dans le vide a pour **longueur d'onde dans le vide** : $\lambda_0 = c T = \frac{c}{f}$, mais si elle se propage dans un milieu avec la vitesse v alors sa longueur d'onde sera différente de λ_0 .

Une lumière monochromatique est définie par sa période, sa fréquence ou sa longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = c T$.

3. Spectre d'une OEM

Une onde électromagnétique est en général la superposition d'ondes électromagnétiques sinusoïdales de différentes fréquences. La lumière est dite polychromatique.

On peut les classer selon leur fréquence ou longueur d'onde dans le vide en différentes catégories représentées dans le spectre électromagnétique ci-dessous.



Le domaine de la lumière visible par l'œil humain occupe une toute petite partie du spectre, il s'étend des longueurs d'ondes allant approximativement de 400 nm à 750 nm.

- **Ultraviolet** : $\lambda_0 < 400$ nm
- **Violet** $\lambda_0 \approx 400$ nm, **bleu** : $\lambda_0 \approx 450$ nm, **vert** $\lambda_0 \approx 550$ nm, **jaune** : $\lambda_0 \approx 580$ nm ; **rouge** : $\lambda_0 \approx 650$ nm
- **Infrarouge** : $\lambda_0 > 750$ nm

Remarque : La sensibilité de notre œil est maximale pour $\lambda_0 \approx 560$ nm (vert)

II. Sources de lumière

1. Source lumineuse

Une source lumineuse est **un objet de la part duquel on reçoit un rayonnement lumineux**.

La lumière émise par une source peut être **décomposée** à l'aide d'un prisme ou d'un réseau (cf. Spé) afin de faire apparaître les différentes **radiations** qui la composent. Le résultat obtenu est le **spectre** de la lumière analysée.

Si le spectre est composé d'un ensemble continu de radiations, c'est un **spectre continu**. Si par contre, il n'est composé que de raies lumineuses, il est nommé **spectre de raies**.

Pour décrire une source dont les dimensions sont petites devant les distances d'observation (*exemple : une étoile*), on utilise le modèle de la source ponctuelle.

Modèle de la source ponctuelle et monochromatique :

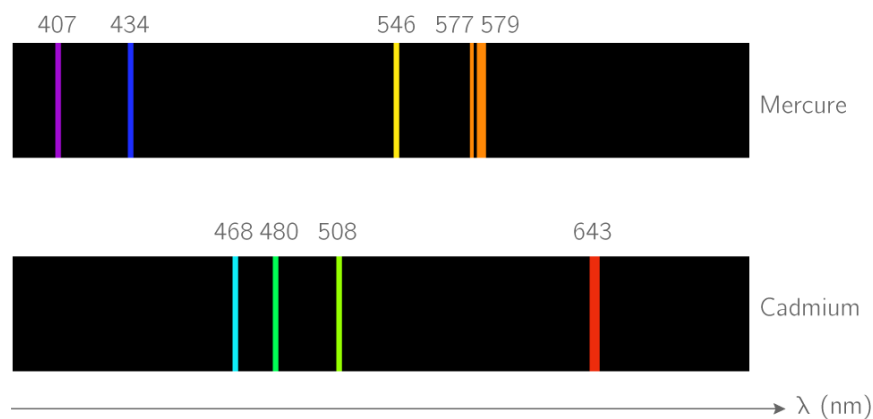
- **Source ponctuelle** ($\neq$ étendue) : la source est assimilée à un point de l'espace. Ce point envoie des rayons dans toutes les directions. Si celle-ci est située à l'infini (distance $\gg$ dimensions du système optique), elle émet un faisceau de rayons parallèles.
- **Source monochromatique** ($\neq$ polychromatique) : le spectre ne contient qu'une seule radiation.

Une source étendue peut être découpée en un ensemble de sources ponctuelles qui émettent indépendamment les unes des autres. Une source étendue observée à grande distance pourra être modélisée par une source ponctuelle.

2. Lampe spectrale

Le principe de fonctionnement d'une lampe spectrale est basé sur la désexcitation d'atomes (atomes initialement excités par collisions ou décharges électriques) qui s'accompagne de l'émission d'un rayonnement composé d'OEM quasiment monochromatiques. Leur spectre est discontinu. Les raies sont caractéristiques atome.

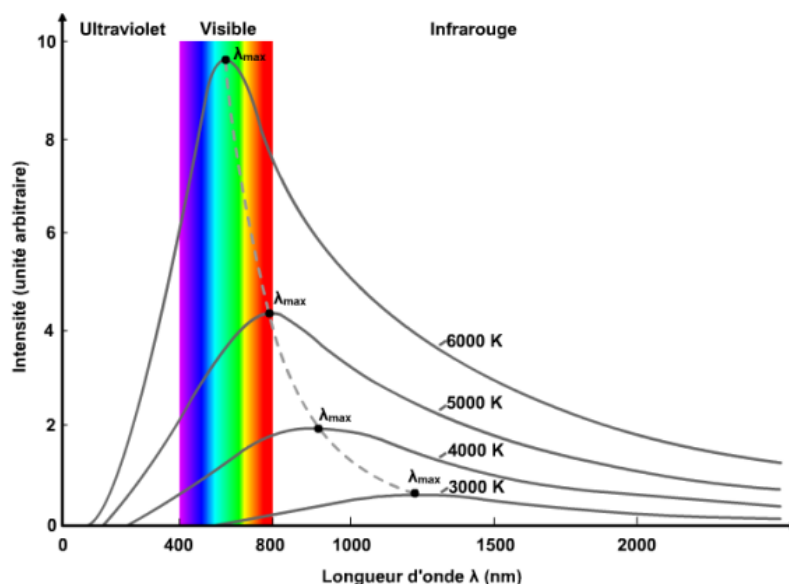
Le spectre d'une lampe spectrale est un spectre de raies.



3. Rayonnement thermique

Dans le modèle dit du « corps noir », un objet porté à une certaine température émet un rayonnement caractéristique comprenant toutes les longueurs d'onde et dépendant seulement de sa température. Son spectre est continu et donc nécessairement polychromatique.

Remarque : Le modèle du corps noir s'applique assez bien aux lampes à incandescence ou aux étoiles. La photosphère (couche externe) de notre Soleil est à 5500 °C. En appliquant la loi de Wien on en déduit que notre étoile émet un spectre continu avec une intensité maximale pour $\lambda = 560$ nm (lumière jaune-verte).

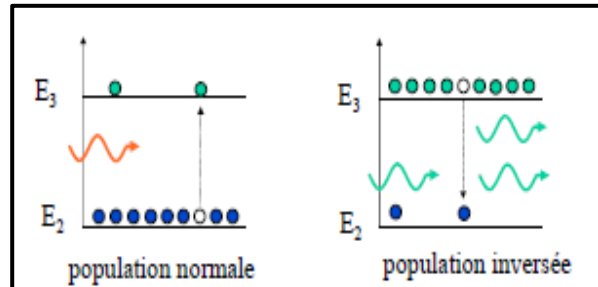
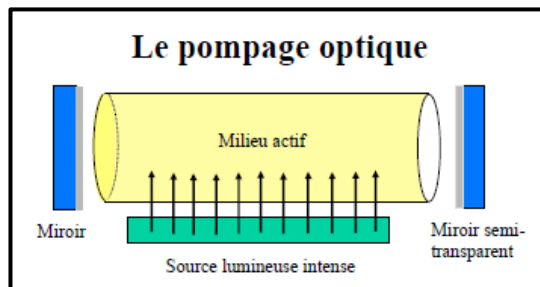


4. Les lasers

LASER est un acronyme signifiant : « Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation ».

Les lasers utilisent le principe de l'émission stimulée (découvert par Einstein). Ils comportent un milieu actif qui produit la lumière (atomes), un système de pompage (pour exciter les atomes) et un système d'amplification (2 miroirs pour que la lumière fasse des allers-retours).

Ils produisent une lumière **très directive** (l'angle de divergence d'un faisceau est de quelques milliradians) et **quasi-monochromatique**.



III. Propagation de la lumière dans un milieu transparent

1. Indice optique d'un milieu transparent

Les milieux dits **transparents** sont des milieux dans lesquels la lumière peut s'y propager sans être absorbée.

Un milieu est **homogène** si ses caractéristiques optiques sont identiques en tout point de ce milieu.

Enfin, un milieu est **isotrope** si la propagation lumineuse est identique quelle que soit la direction de propagation dans le milieu.

L'indice optique ou indice de réfraction d'un MHTI est défini comme le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide c sur sa vitesse dans le milieu matériel v : $n = \frac{c}{v}$.

Dans les milieux transparents ordinaires aux fréquences usuelles, on a généralement $n \geq 1$.

Exemples :

- l'indice du vide est par définition égal à 1.
- celui de l'air (dans les conditions normales) est égal à 1,000293. Souvent on utilise $n(\text{air}) = 1$.
- pour $\lambda_0 = 589 \text{ nm}$: $n(\text{eau}) = 1,33$ $n(\text{verres})$ de 1,5 à 1,8 $n(\text{diamant}) = 2,42$

Dans un **milieu dispersif** la vitesse d'une lumière monochromatique dépend de sa fréquence et donc de sa longueur d'onde dans le vide λ_0 .

La **loi empirique de Cauchy** traduit cette dépendance pour la plupart des milieux transparents :

$$n(\lambda_0) = A + \frac{B}{\lambda_0^2} \quad \text{où } A \text{ et } B \text{ sont des constantes positives.}$$

Ainsi $n_{\text{bleu}} > n_{\text{rouge}}$ et $v_{\text{bleu}} < v_{\text{rouge}}$.

Applications : spectroscopie à prisme, arc en ciel

2. Relation entre λ et λ_0

Soit une lumière monochromatique de fréquence f se propageant à la vitesse v dans un milieu transparent d'indice n . La longueur d'onde λ de la lumière dans le milieu est $\lambda = \frac{v}{f} = \frac{c}{nf} = \frac{c}{n} \frac{1}{f}$ soit :

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

Application 1 : Longueur d'onde d'un laser et énergie d'un photon

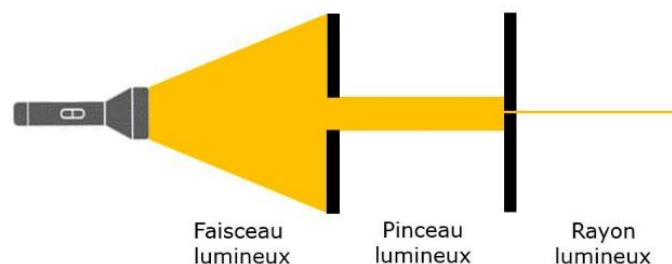
Un laser hélium-néon émet un faisceau de lumière dont la longueur d'onde dans le vide est égale à 633 nm.

- 1) On éclaire un écran blanc : de quelle couleur est la tâche observée ?
- 2) Le faisceau laser est ensuite envoyé dans un morceau de verre d'indice optique 1,5. Calculer la longueur d'onde dans le plexiglas. La couleur est-elle modifiée ?

IV. Bases de l'optique géométrique

1. Approximation de l'optique géométrique

Le rayon lumineux est une notion d'optique et un outil mathématique, décrivant le trajet de la lumière de manière simplificatrice. Du fait du phénomène de diffraction, il n'a pas d'existence physique réelle et représente le cas idéal où il serait possible de sélectionner un faisceau parallèle infiniment fin de lumière.



Lorsque les longueurs caractéristiques du système (diamètre du diaphragme, de la lentille, ...) sont grandes devant la longueur d'onde λ de la lumière alors on constate que le phénomène de diffraction lié au caractère ondulatoire de la lumière est négligeable.

La notion de rayon lumineux est valable uniquement lorsque le rayon lumineux se propage dans des milieux où les obstacles et composants optiques ont des dimensions très supérieures à la longueur d'onde (phénomènes de diffraction et d'interférences négligeables).

Dans cette approximation, dite de l'optique géométrique, on appelle rayon lumineux toute courbe suivant laquelle se propage la lumière. Ils permettent de décrire la propagation de l'énergie lumineuse dans le cadre de l'optique géométrique.

Sauf mention contraire, on considère dorénavant que les conditions de l'optique géométrique seront satisfaites.

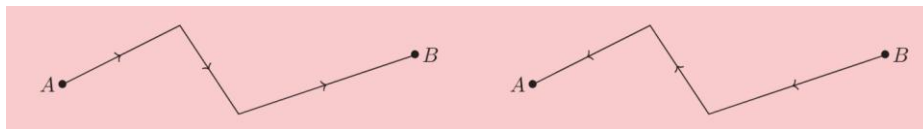
2. Propriétés des rayons lumineux

Le **principe de Fermat**, énoncé par Pierre de Fermat en 1657, est un principe physique qui décrit la propagation des rayons lumineux. Dans sa version première, ce principe, dit aussi « principe de moindre temps », stipule que **la lumière se propage d'un point à un autre sur des trajectoires telles que la durée du parcours est minimale** (dans une version plus moderne, elle est stationnaire). On peut déjà en déduire les deux propriétés suivantes :

- **Propagation rectiligne :**

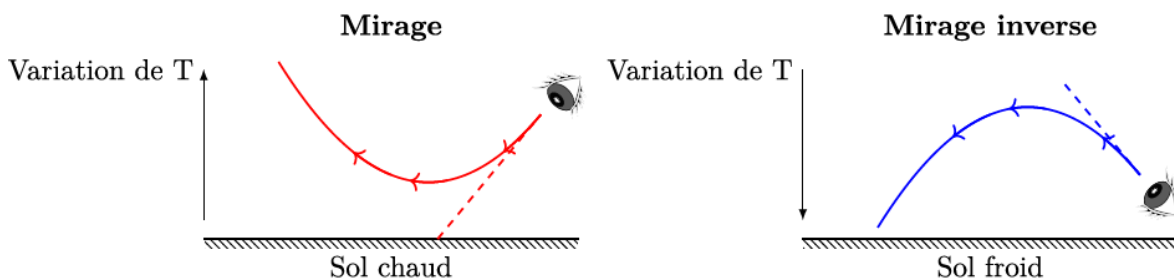
Dans un MHTI, la lumière se propage rectilignement : les rayons lumineux sont des droites.

- **Principe du retour inverse de la lumière :** Si un rayon lumineux suit un certain trajet pour aller d'un point A à un point B, alors, en inversant le sens de propagation, il suit exactement le même trajet pour aller de B à A : **le trajet suivi par la lumière entre deux points est indépendant du sens de propagation de la lumière.**



Une autre propriété est **l'indépendance des rayons** : les rayons lumineux n'interagissent pas ensemble et sont donc indépendants les uns des autres.

Remarque : Propagation de la lumière dans un milieu non homogène

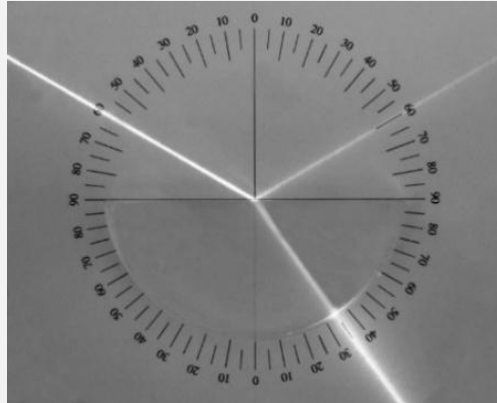


Mirages et Courbure du faisceau lumineux sous l'effet d'un gradient de concentration

V. Changement de milieu : lois de Snell -Descartes

1. Phénomènes de réfraction et réflexion

On étudie le comportement de la lumière au passage d'un milieu (l'air) à un autre (le plexiglas).



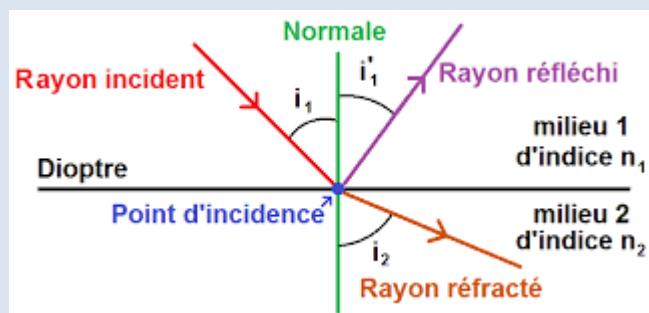
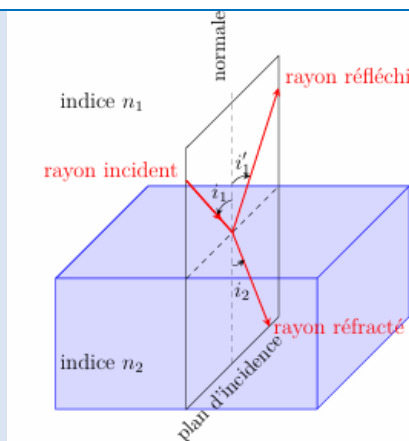
On observe qu'une partie de l'énergie lumineuse est transmise avec changement de direction et qu'une autre partie est réfléchie de façon symétrique.

Lorsqu'un rayon lumineux, dit incident, arrive sur un dioptré (interface séparant 2 milieux transparents d'indices différents), il donne généralement naissance à un rayon réfléchi, qui repart dans le milieu du rayon incident et un rayon réfracté qui se propage dans l'autre milieu.

2. Enoncé des lois

Les rayons lumineux obéissent aux lois de la réflexion et de la réfraction, souvent appelées **lois de Snell-Descartes**.

On définit la **normale** comme la droite perpendiculaire au dioptré au point d'incidence, point d'intersection entre le rayon incident et le dioptré. La normale et le rayon incident définissent le **plan d'incidence**.



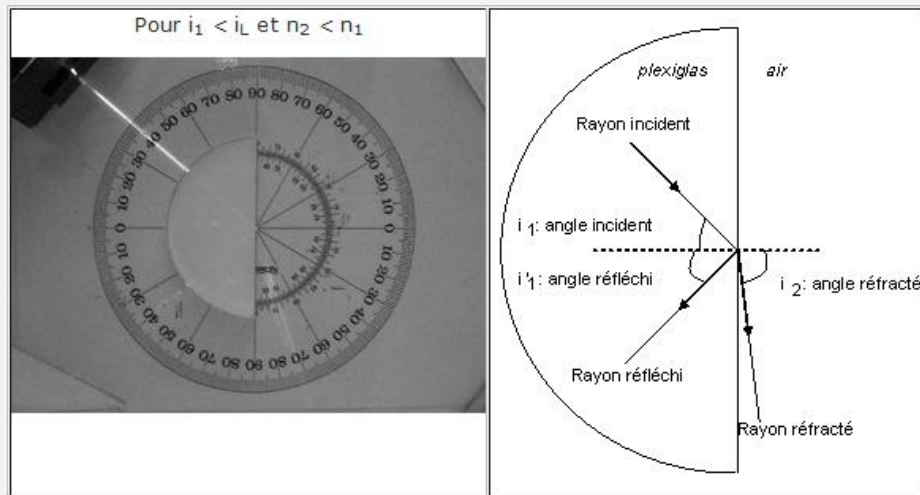
- Les rayons réfléchi et réfracté appartiennent au plan d'incidence.
- Loi de la réflexion : Le rayon réfléchi est symétrique du rayon incident par rapport à la normale : $i_1' = -i_1$ (avec les angles orientés)
- Loi de la réfraction : Le rayon réfracté est tel que $n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$

dépendent de l'angle d'incidence, des indices des milieux et de la polarisation de la lumière (cf. Spé). *Par exemple, une simple vitre réfléchit seulement 4% environ de la lumière en incidence normale.*

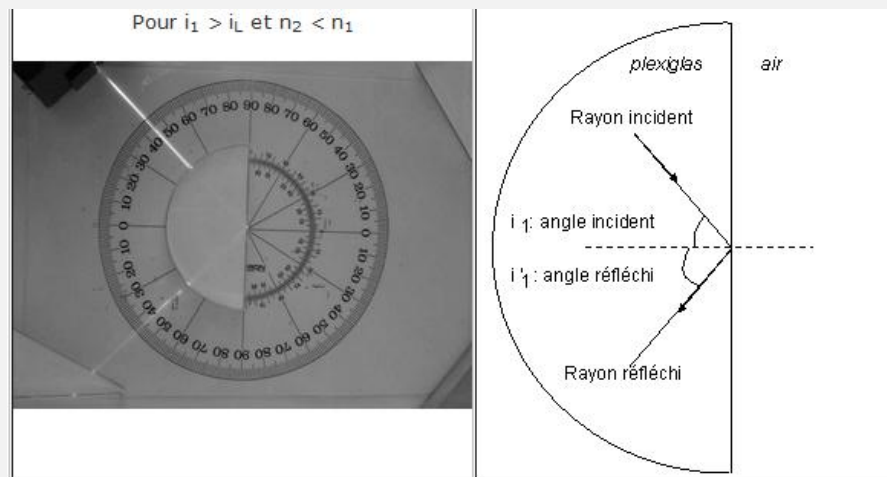
VI. Réflexion totale

1. Mise en évidence

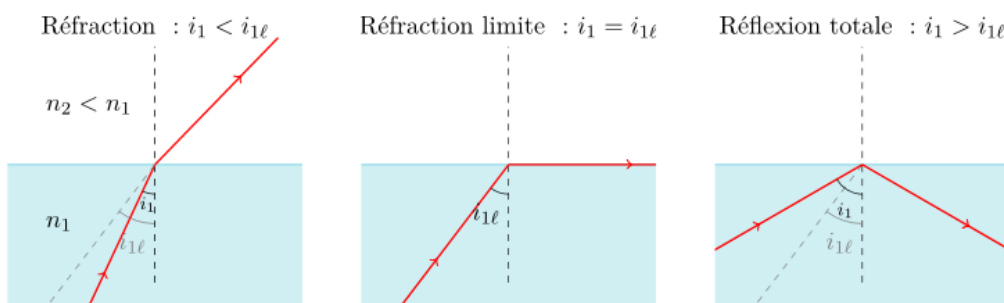
On étudie la propagation d'un rayon lumineux vers un milieu moins réfringent. On augmente progressivement l'angle d'incidence.



Au-delà d'un certain angle, il n'y a plus de rayon réfracté mais uniquement un rayon réfléchi.



2. Conditions de réflexion totale



Dans le cas où $n_1 > n_2$, il existe une incidence limite i_{1l} pour laquelle $i_2 = \frac{\pi}{2}$ et au-delà de laquelle le rayon réfracté n'existe plus. C'est le phénomène de réflexion totale.

Pour observer le phénomène de réflexion totale :

- La lumière doit se propager d'un milieu 1 plus réfringent vers un milieu 2 moins réfringent : $n_1 > n_2$
- L'angle d'incidence doit être plus grand que l'angle limite $i_{1l} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$.

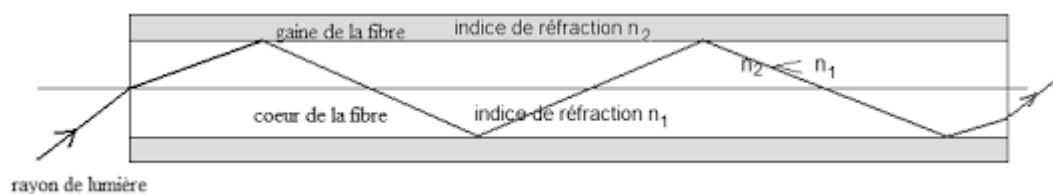
Application 4 : Réflexion totale et angle d'incidence limite

Calculer l'angle au-delà duquel un rayon incident dans le verre rencontrant une interface verre ($n_{\text{verre}} = 1.5$)/eau ($n_{\text{eau}} = 1.33$) est totalement réfléchi.

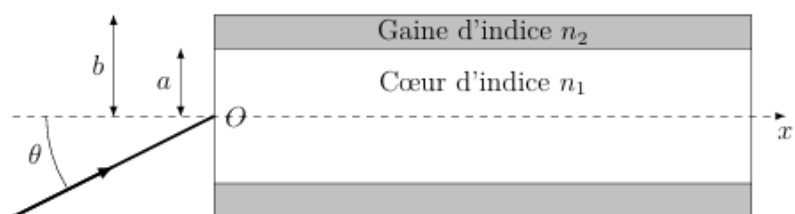
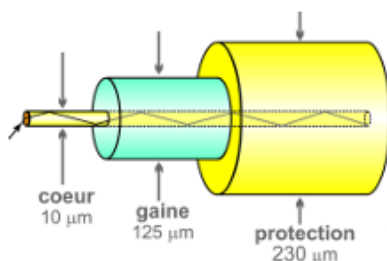
3. Application de la réflexion totale : la fibre optique à saut d'indice

Le phénomène de réflexion totale est utilisé dans les fibres optiques à saut d'indice afin de guider la lumière.

Une fibre optique à saut d'indice est constituée d'un cylindre de verre (ou de plastique) appelé cœur ou âme, MHTI d'indice n_1 de rayon a , entourée d'une gaine transparente d'indice de réfraction n_2 . La gaine contribue non seulement aux propriétés mécaniques de la fibre mais évite aussi les fuites de lumière vers d'autres fibres en cas de contact.



Actuellement le diamètre du cœur d'une fibre varie de 3 à 200 μm selon les propriétés et le diamètre extérieur de la gaine peut atteindre 400 μm . La gaine est entourée par un matériau protecteur (plastique en général) pour atteindre un diamètre total de l'ordre du millimètre.



Les faces d'entrée et de sortie sont perpendiculaires à l'axe du cylindre (Ox) formé par la fibre. L'ensemble, en particulier la face d'entrée, est en contact avec un milieu d'indice n_2 .

On s'intéresse à la trajectoire d'un rayon lumineux situé dans le plan de symétrie contenant l'axe (Ox).

Le cône d'acceptance d'une fibre optique est le cône à l'intérieur duquel les rayons incidents seront guidés par réflexion totale interne.

Application 5 : Cône d'acceptance d'une fibre ♥

- 1) Compléter le schéma du document 8 en faisant apparaître le rayon réfracté.
- 2) Etablir la condition sur l'angle d'incidence i_1 sur le dioptré cœur/gaine pour qu'il s'y produise une réflexion totale.
- 3) En déduire une condition sur l'angle de réfraction r au niveau du dioptré d'entrée air/cœur.
- 4) En déduire que ce rayon ne peut être guidé dans le cœur que si le rayon incident parvient dans le cône d'acceptance d'angle au sommet θ_{max} , dont on exprimera le sinus en fonction de n_2 et n_1 .

Dispersion intermodale :

Les rayons parvenant dans la fibre avec des angles d'incidence différents suivent des chemins optiques (ou modes) différents. À chaque mode correspond un temps de parcours légèrement différent, ce qui entraîne une dispersion intermodale. On définit le retard intermodal qui est le temps de retard à l'arrivée du rayon le plus lent (le plus incliné) par rapport au rayon le plus rapide (rayon axial).

Application 6 : Dispersion intermodale d'une fibre ♥

Une impulsion lumineuse très brève arrive à $t = 0$, au point O sur la fibre précédente de longueur L , sous la forme d'un faisceau conique convergent d'axe Ox et de demi-angle θ_{max} .

- 1) Quel rayon a la durée de parcours la plus courte ? Déterminer cette durée minimale t_{min} en fonction de L , n_1 et c .
 - 2) Quel rayon a la durée de parcours la plus longue ? Déterminer cette durée t_{max} maximale en fonction de L , n_1 , c et n_2 .
 - 3) Représenter l'impulsion en sortie et exprimer la durée de cette impulsion à la sortie de la fibre en fonction de L , n_1 , c et n_2 .
 - 4) Le codage binaire de l'information consiste à envoyer des impulsions lumineuses (appelées « bits ») périodiquement avec une fréquence d'émission f . En supposant la durée de chaque impulsion négligeable devant la période T , quelle condition portant sur la fréquence d'émission f exprime le non-recouvrement des impulsions à la sortie de la fibre optique ?
- Application numérique : $n_1 = 1,456$, $n_2 = 1,410$, $L = 1 \text{ km}$, $c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$

