

Chapitre 1

Bases de l'optique géométrique

I. Nature ondulatoire de la lumière

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

II. Sources de lumière

1. Sources à spectres de raies
2. Sources à spectre continu
3. Les lasers
4. Source ponctuelle monochromatique

III. Propagation de la lumière dans un milieu

1. Indice de réfraction d'un milieu linéaire transparent homogène et isotrope (MLHTI)

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. Énoncé des lois

VI. Réflexion totale

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



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

Le cours

I. Nature ondulatoire de la lumière

1. La lumière : une onde électromagnétique (OEM)

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 aussi de la fréquence de l'OEM si le milieu est dispersif.**

2. Caractéristiques d'une OEM sinusoïdale

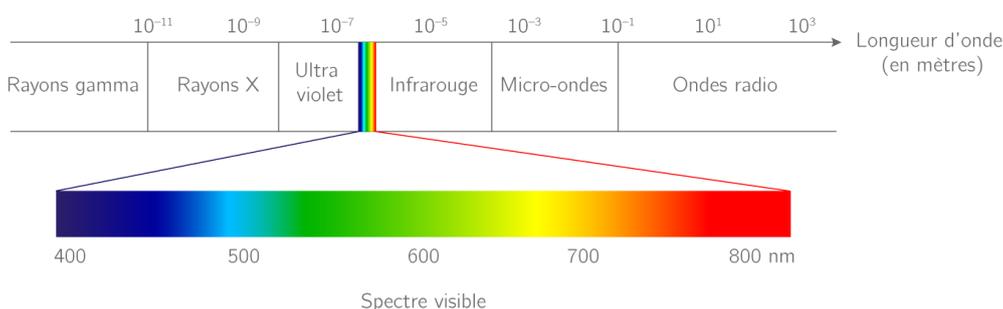
Une OEM sinusoïdale de fréquence donnée est dite monochromatique. Elle est caractérisée par sa période (temporelle) T et sa fréquence f , parfois notée avec la lettre grecque «nu» $\nu : f = \frac{1}{T}$. **Ces grandeurs ne dépendent pas du milieu de propagation.**

La longueur d'onde λ est donnée par la relation $\lambda = \nu T$ où ν 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** : $\lambda_0 = cT = \frac{c}{f}$, 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 $\lambda_0 = cT$.

3. Spectre d'une OEM

Une OEM est en général la superposition d'OEM sinusoïdales de différentes fréquences. On peut classer les OEM monochromatiques 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 est une toute petite partie du spectre des OEM qui s'étend des longueurs d'ondes allant de 400 nm environ à presque 800 nm.

- Ultraviolet : $\lambda_0 < 400 \text{ nm}$
- Violet $\lambda_0 \approx 400 \text{ nm}$, bleu : $\lambda_0 \approx 450 \text{ nm}$, vert $\lambda_0 \approx 550 \text{ nm}$, jaune : $\lambda_0 \approx 580 \text{ nm}$; rouge : $\lambda_0 \approx 650 \text{ nm}$
- Infrarouge : $\lambda_0 > 800 \text{ nm}$

La sensibilité de notre œil est maximale pour $\lambda_0 \approx 560 \text{ nm}$ (vert)

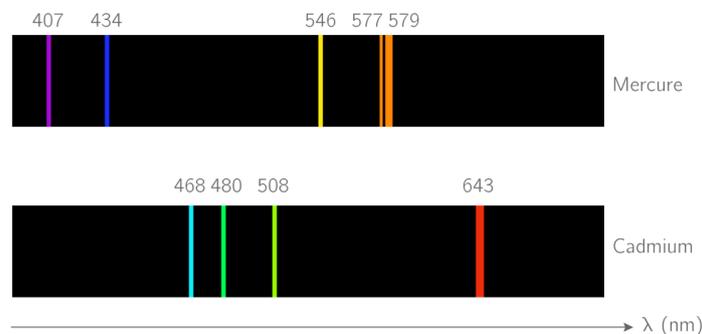
II. Sources de lumière

1. Sources à spectres de raies

Les sources de lumière basées sur la désexcitation d'atomes (atomes excités par collisions ou décharges électriques) émettent un rayonnement composé d'OEM quasiment monochromatiques.

La décomposition de ce type de lumière par un prisme ou un réseau donne un ensemble de raies caractéristiques de la composition de la source.

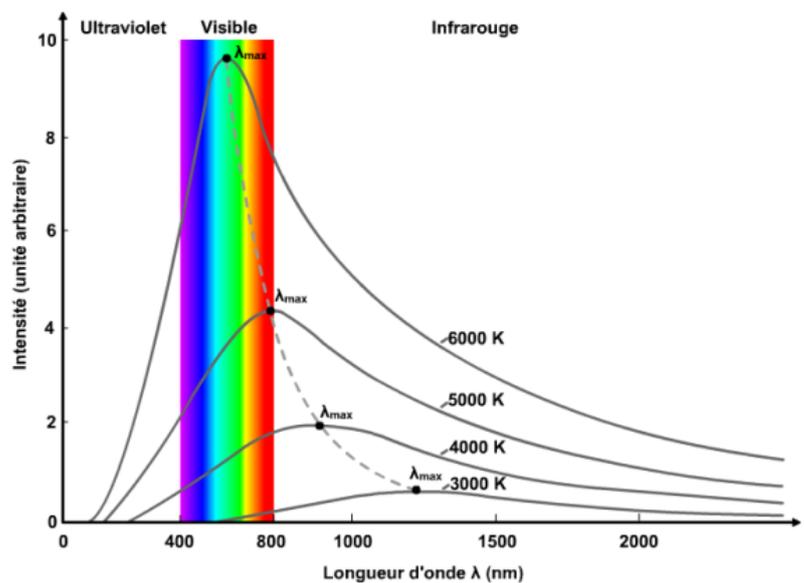
Exemples :



2. Sources à spectre continu

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

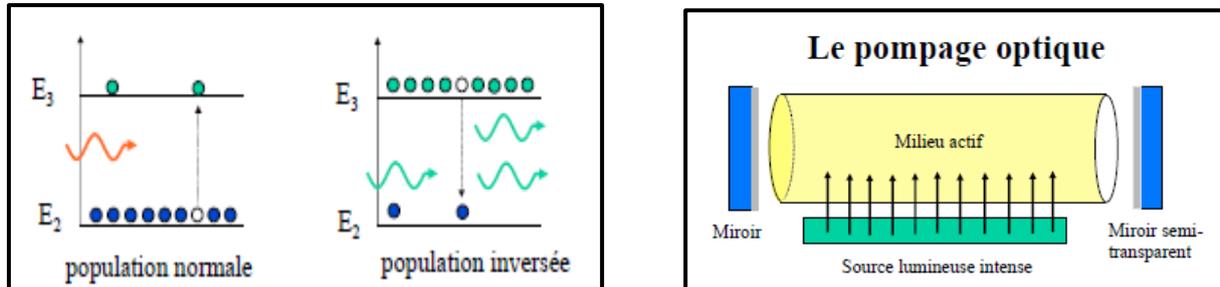
Le modèle du corps noir s'applique assez-bien aux étoiles. La photosphère (couche externe) de notre Soleil est à 5500 °C. En appliquant la loi de Wien on en déduit que notre étoile émet un spectre continu avec une intensité maximale pour $\lambda = 560 \text{ nm}$ (lumière jaune-verte).



3. 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** ($\frac{\Delta\nu}{\nu} \approx 10^{-10}$).

4. Source ponctuelle monochromatique

Dans la suite nous utiliserons le modèle de la source ponctuelle et monochromatique :

- **Source ponctuelle** (\neq étendue) : la source est 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 monochromatique.

Une source étendue peut être découpée en une assemblée de sources quasi ponctuelles qui émettent indépendamment les unes des autres. Une source polychromatique peut être décomposée en sources quasi monochromatiques.

III. Propagation de la lumière dans un milieu

1. Indice de réfraction d'un milieu linéaire transparent homogène et isotrope (MLHTI)

La traversée d'un milieu **linéaire** ne modifie pas la fréquence de l'onde sinusoïdale.

Les milieux dits **transparents** sont des milieux dans lesquels la lumière est susceptible de se 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 de réfraction (ou indice optique) d'un MLHTI est défini comme le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide c sur sa vitesse dans le milieu matériel v : $n = \frac{c}{v}$.

Comme la vitesse c est une vitesse limite on a $v \leq c$ donc $n \geq 1$.

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 :

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

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

Applications : spectroscope à prisme, arc en ciel

2. Relation entre λ et λ_0

Soit une lumière monochromatique de fréquence ν 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 $\lambda = \frac{v}{\nu} = \frac{c}{n\nu} = \frac{c}{f n}$ soit :

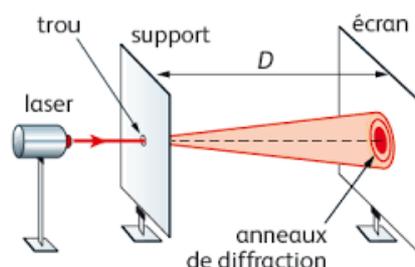
$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

AP 1

IV. Bases de l'optique géométrique

1. Approximation de l'optique géométrique

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.

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 les phénomènes de diffraction ou d'interférences liés au caractère ondulatoire de la lumière sont négligeables.

Dans cette approximation, les rayons lumineux sont un modèle permettant 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 : la longueur d'onde sera très inférieure aux dimensions caractéristiques du système optique.

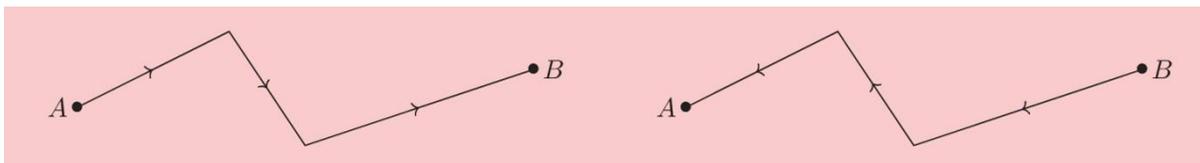
2. Propriétés des rayons lumineux

Le **principe de Fermat**, énoncé par Pierre de Fermat en 1657, est un principe physique qui décrit la propagation des rayons lumineux. **La lumière se propage d'un point à un autre sur des trajectoires telles que la durée du parcours est stationnaire.**

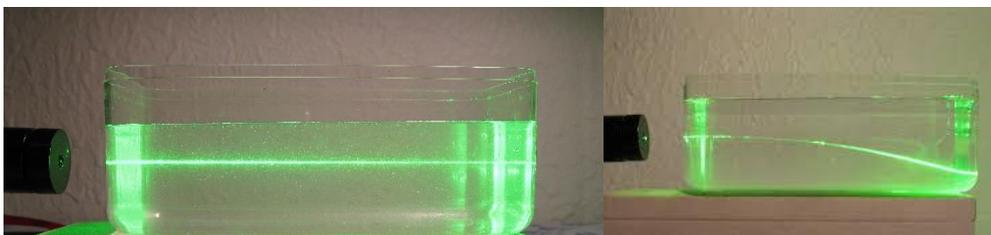
- **Propagation rectiligne :**

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

- **Indépendance des rayons :** les rayons lumineux n'interagissent pas ensemble et sont donc indépendants les uns des autres.
- **Principe du retour inverse de la lumière :** le trajet suivi par la lumière entre deux points situés sur le même rayon lumineux est indépendant du sens de propagation de la lumière.



Remarque : Propagation de la lumière dans un milieu non homogène



Courbure du faisceau lumineux

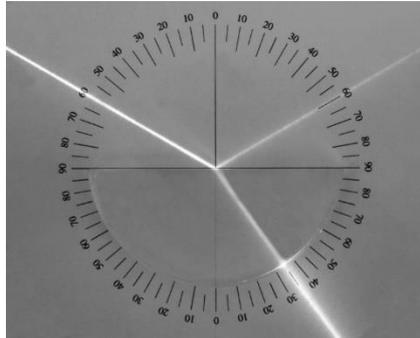


Mirages

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).



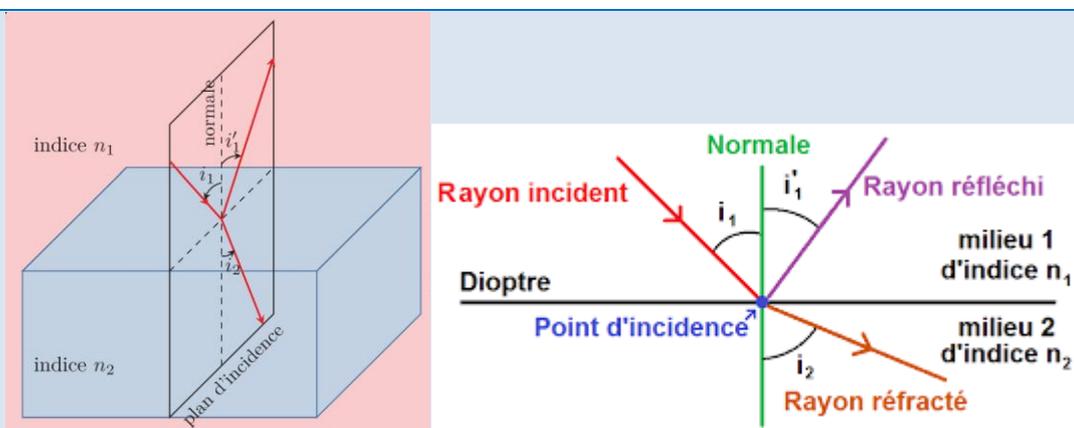
On observe qu'une partie de l'énergie lumineuse est transmise avec changement de direction et qu'une autre partie est réfléchi de façon symétrique.

Lorsqu'un rayon lumineux, dit incident, arrive sur un dioptre (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

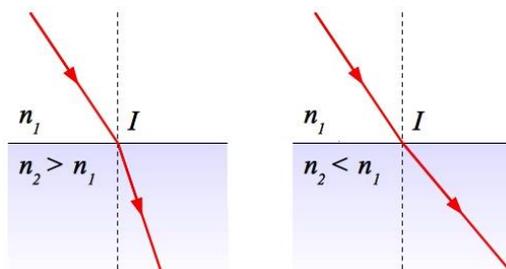
Les rayons lumineux obéissent aux lois de la réflexion et de la réfraction, souvent appelées **lois de Snell-Descartes**.

On définit la **normale** comme la droite perpendiculaire au dioptre au point d'incidence, point d'intersection entre le rayon incident et le dioptre. 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 : $i_1' = -i_1$
- Loi de la réfraction : Le rayon réfracté est tel que $n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$

- Si $n_2 > n_1$: le milieu 2 est plus réfringent que le milieu 1, le rayon réfracté se rapproche de la normale, il existe toujours.
- Si $n_1 > n_2$: le milieu 2 est dit moins réfringent que le milieu 1, le rayon réfracté s'écarte de la normale.



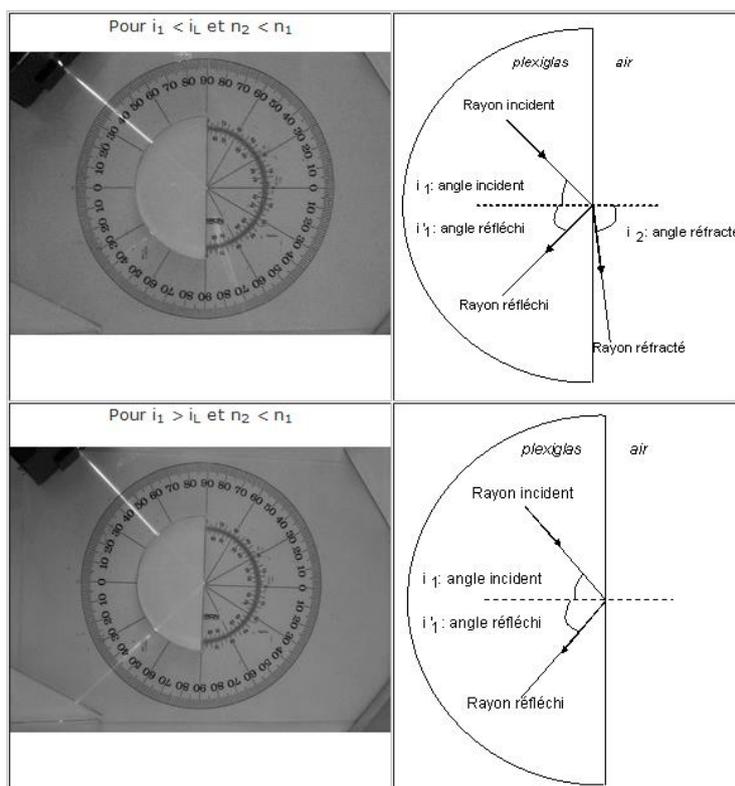
Remarque : Si l'incidence est normale ($i_1 = 0$), le rayon réfracté n'est pas dévié ($i_2=0$).

AP 2 et 3

VI. Réflexion totale

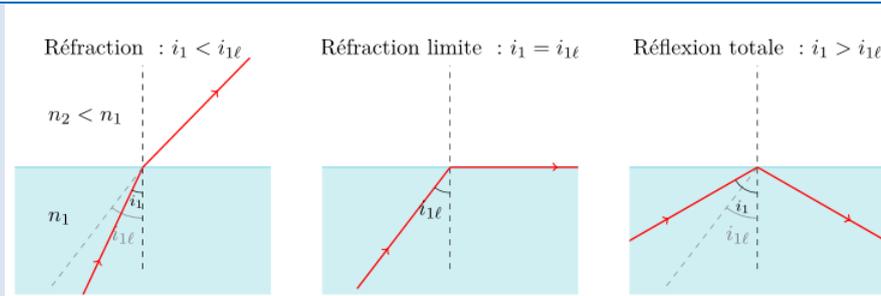
1. Mise en évidence

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. Condition 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 :

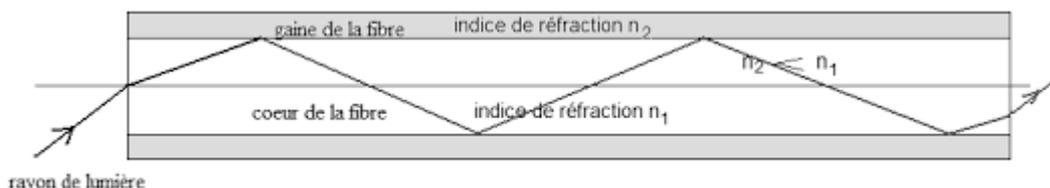
- Le rayon lumineux doit passer d'un milieu plus réfringent à un milieu moins réfringent.
- L'angle d'incidence doit être plus grand que l'angle limite de réfraction :

$$i_{1,l} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

AP 4

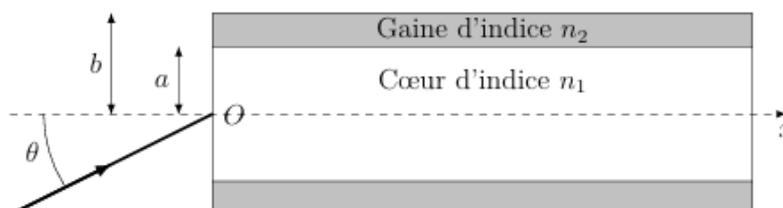
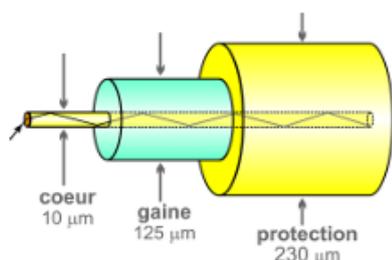
3. Application de la réflexion totale : la fibre optique à saut d'indice

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_0 .

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.

AP 5

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).

AP 6

Applications

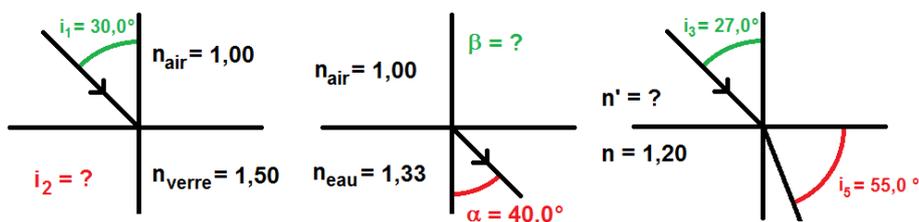
Application 1 : Longueur d'onde d'un laser et énergie d'un photon

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 ? Justifier.

Application 2 : Réfraction

Calculer les grandeurs demandées ci-dessous.



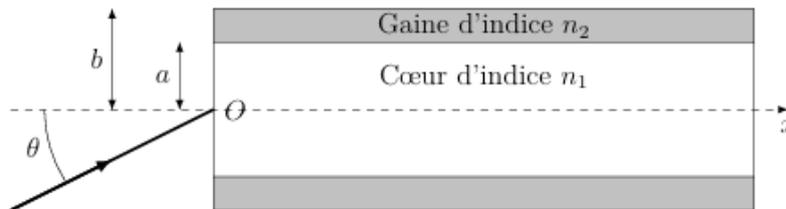
Application 3 : Réfraction bis

Un rayon lumineux dans l'air tombe sur la surface d'un liquide ; il fait un angle de 56° avec le plan horizontal. La déviation entre le rayon incident et le rayon réfracté est de $13,5^\circ$. Quel est l'indice optique n du liquide ?

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.

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



- 1) Compléter le schéma ci-dessus en faisant apparaître le rayon réfracté.
- 2) Etablir la condition sur l'angle d'incidence i_1 sur le dioptre 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 dioptre 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 .

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 θ_{max} .
- 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 θ_{max} . l'élargissement temporel
- 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 T, quelle condition portant sur la fréquence d'émission f exprime le non-recouvrement des impulsions à la sortie de la fibre optique ?



En entrée de la fibre

Application numérique : $n_1 = 1,456$, $n_2 = 1,410$, $L = 1\text{km}$, $c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$