



Bases de l'optique géométrique

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'Edmond 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 électromagnétique 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.

I. Nature de la lumière

1. La lumière : une onde électromagnétique (OEM)

1.1 Nature d'une onde électromagnétique

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 vitesse de propagation d'une OEM est une propriété du milieu et peut dépendre aussi de la fréquence de l'OEM (milieu dispersif).

Mais contrairement aux ondes mécaniques, une OEM peut se propager dans le vide. Dans le vide une OEM se propage à la vitesse constante

$$c = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

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

1.2 Caractéristiques d'une OEM sinusoïdale

Une OEM sinusoïdale est caractérisée par sa période temporelle (souvent nommée période) T (en s) et sa fréquence (en Hz), souvent notée avec la lettre grecque «nu» ν : $\nu = \frac{1}{T}$. **Ces grandeurs ne dépendent pas du milieu de propagation.**

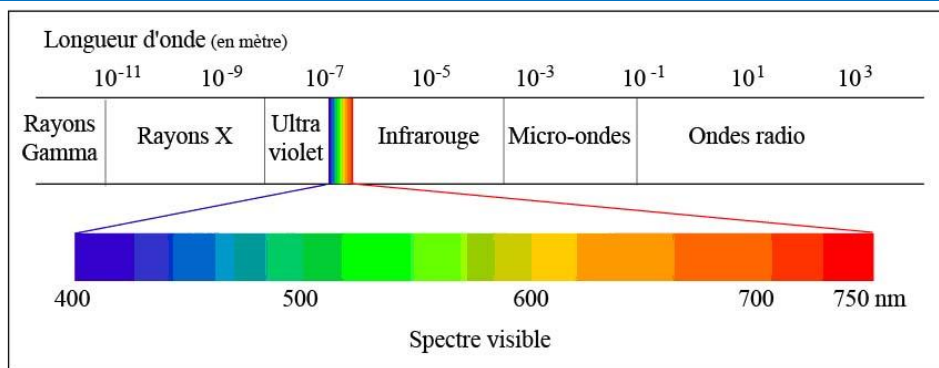
La longueur d'onde λ (en m) est donnée par la relation $\lambda = \nu T = \frac{v}{\nu}$ où v (en m/s) est la vitesse de propagation, ou célérité, de l'OEM. Elle dépend du milieu de propagation : **une OEM sinusoïdale de fréquence ν et se propageant dans le vide a pour longueur d'onde $\lambda_0 = \frac{c}{\nu}$,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

1.3 Spectre des OEM

Une OEM est en général la superposition d'OEM sinusoïdales de différentes fréquences. Une OEM sinusoïdale de fréquence donnée est une OEM monochromatique.

On peut classer les OEM monochromatiques en différentes catégories représentées dans le spectre électromagnétique ci-dessous.

La grandeur physique qui caractérise une onde lumineuse est la fréquence mais généralement, on caractérise une couleur par sa **longueur d'onde dans le vide**.



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** : $\lambda_0 < 400$ nm
- **Violet, bleu** : $\lambda_0 \approx 450$ nm ; **vert, jaune** : $\lambda_0 \approx 580$ nm ; **orange, rouge** : $\lambda_0 \approx 650$ nm
- **Infrarouge** : $\lambda_0 > 800$ nm
- **La sensibilité de notre œil est maximale pour $\lambda_0 \approx 560$ nm (vert)**

2. La lumière : un flux de photons

2.1 Découverte de l'effet photoélectrique

En 1887 l'allemand Heinrich Rudolf Hertz étudie les ondes électromagnétiques de grandes longueurs d'onde (appelées plus tard ondes hertziennes) et remarque qu'un rayonnement ultraviolet peut provoquer des décharges électriques au niveau des électrodes de son détecteur d'ondes. Par la suite d'autres scientifiques étudieront ce phénomène de décharge qu'on appellera **effet photoélectrique**. Ce phénomène ne pouvait s'expliquer par la physique classique qui considère le rayonnement électromagnétique comme une onde.

2.2 L'interprétation magistrale d'Einstein

En 1900, Max Planck (Prix Nobel en 1918) émet l'hypothèse que les échanges d'énergie entre la lumière et la matière ne peuvent se faire que par paquets d'énergie : les **quanta**.

Le plus petit paquet d'énergie échangé avec une radiation de fréquence ν vaut $h\nu$, où h est la constante de Planck, $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J.s.

En 1905, Albert Einstein, pour expliquer l'effet photoélectrique, propose un **modèle corpusculaire de la lumière**.

La lumière serait constituée de petits « grains d'énergie » : les photons, particules sans masse transportant chacun une énergie dépendant de la fréquence de la radiation :

$$E_{\text{photon}} = h\nu$$

où $h = 6,626 \times 10^{-34}$ J.s est une constante fondamentale appelée *constante de Planck* et ν la fréquence du rayonnement électromagnétique (en hertz).

2.3 Dualité onde-corpuscule

Pour interpréter certaines expériences, on utilise l'aspect ondulatoire (expériences de diffraction, d'interférences). Dans d'autres expériences, c'est l'aspect corpusculaire qui prédomine (effet photoélectrique, absorption de photons sur un capteur photoélectrique, émission ou absorption de photon par un atome...). La lumière est donc à la fois une OEM est un flux de « corpuscules » (photons) : c'est la **dualité onde-corpuscule**.

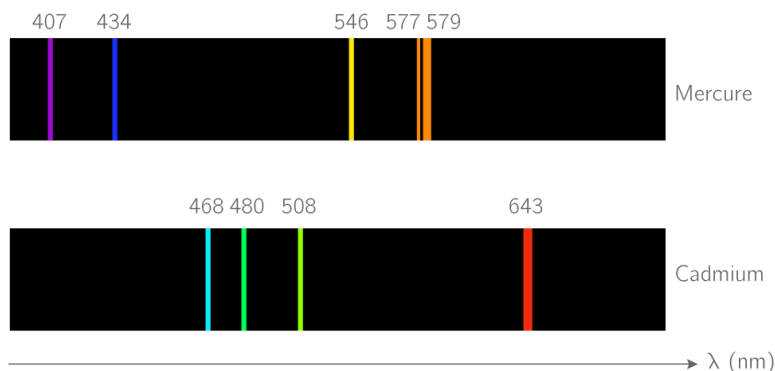
II. Sources de lumière

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.

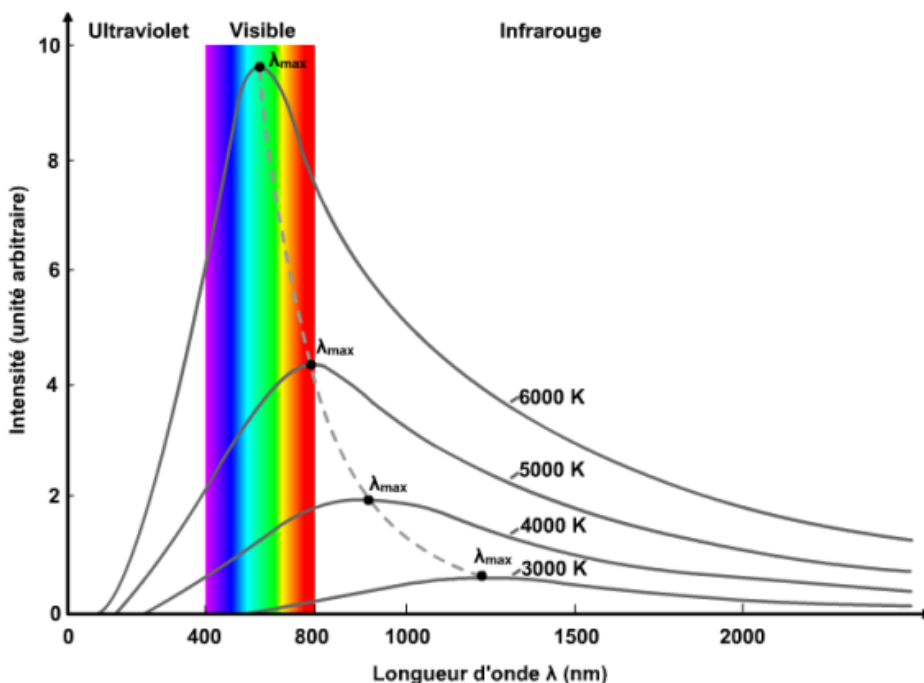
La décomposition de ce type de lumière par un prisme ou un réseau donne un ensemble de raies caractéristiques de la composition de la source.

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.

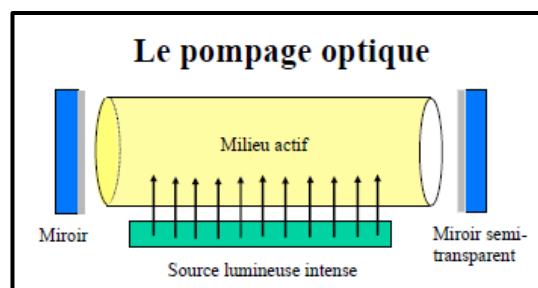
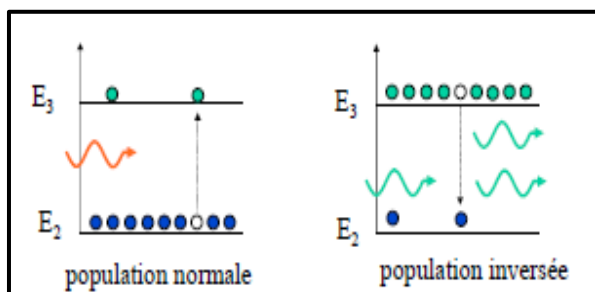


Le modèle du corps noir s'applique assez-bien aux étoiles. La photosphère (couche externe) de notre Soleil est à 5500 °C. En appliquant la loi de Wien on en déduit que notre étoile émet un spectre continu avec une intensité maximale pour λ = 560 nm (lumière jaune-verte).

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

III. Propagation de la lumière dans les milieux matériels

1. Absorption et dispersion

Les interactions de la lumière avec le milieu matériel modifient la propagation de la lumière de deux façons :

- Les composantes monochromatiques de la lumière se propagent à des vitesses différentes : c'est le phénomène de **dispersion**.

Ce phénomène de dispersion explique par exemple la décomposition de la lumière blanche par un prisme ou l'existence des arcs en ciel.



- L'intensité lumineuse décroît lors de la propagation de la lumière dans un milieu matériel : c'est le phénomène d'**absorption**. La loi de décroissance est en général une fonction exponentielle de la distance parcourue et dépend de la fréquence.

2. Indice de réfraction d'un milieu transparent homogène et isotrope (MHTI)

Les milieux étudiés en optique géométrique sont des milieux dans lesquels la lumière est susceptible de se propager. De tels milieux sont dits **transparents**. 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 MHTI est défini comme le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide c sur sa vitesse dans le milieu matériel v : $n = \frac{c}{v}$

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

Dans un **milieu dispersif** la vitesse v d'une lumière monochromatique dépend de sa fréquence ν (*lettre nu et non un ν*) et donc de sa longueur d'onde dans le vide λ_0 . L'indice du milieu n dépend alors de λ_0 . La loi empirique de Cauchy traduit cette dépendance pour la plupart des milieux transparents :

$$n(\lambda_0) = A + \frac{B}{\lambda_0^2} \text{ où } A \text{ et } B \text{ sont des constantes positives. Ainsi } n_{\text{bleu}} > n_{\text{rouge}} \text{ et } \lambda_{\text{bleu}} < \lambda_{\text{rouge}}.$$

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 $n(\text{diamant}) = 2,42$

3. 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 .

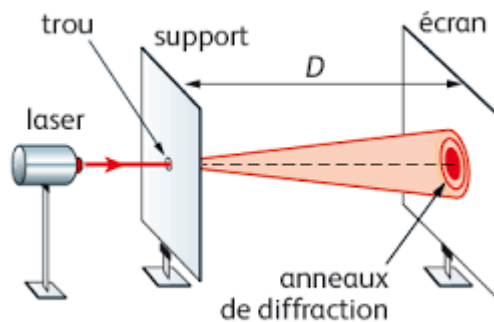
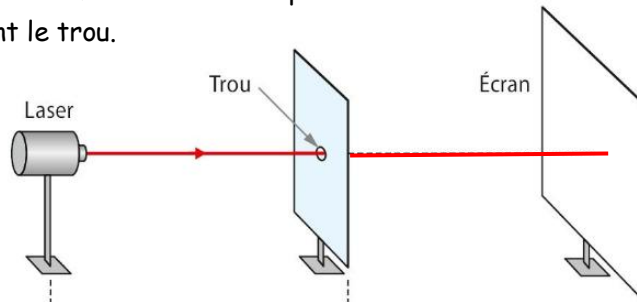
La longueur d'onde λ de la lumière dans le milieu est $\lambda = \frac{v}{\nu} = \frac{c}{n} \cdot \frac{1}{\nu} = \frac{c}{\nu} \cdot \frac{1}{n}$ soit : $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$.

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 ce cas on peut traiter la lumière à l'aide de la notion de **rayons lumineux** dans le cadre de l'optique géométrique.

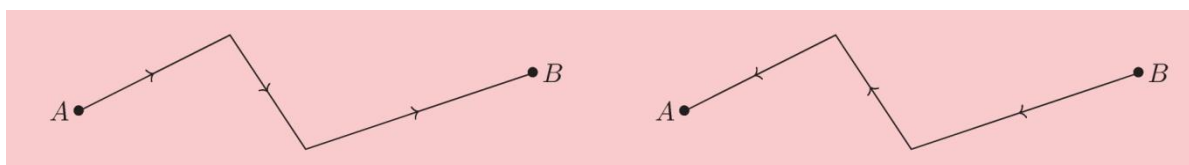
Sauf mention contraire, on considère dorénavant que les conditions de l'optique géométrique seront satisfaites : la longueur d'onde sera très inférieure aux dimensions caractéristiques du système optique.

2. Propriétés des rayons lumineux

- Propagation rectiligne :

Dans un milieu homogène et isotrope, 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.

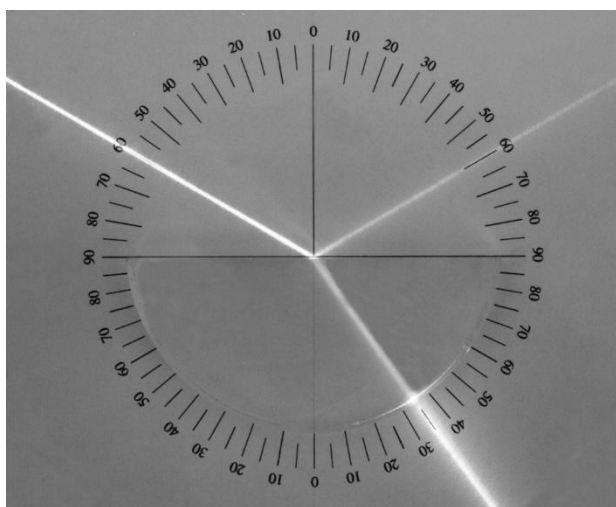


V. Lois de Snell -Descartes

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).



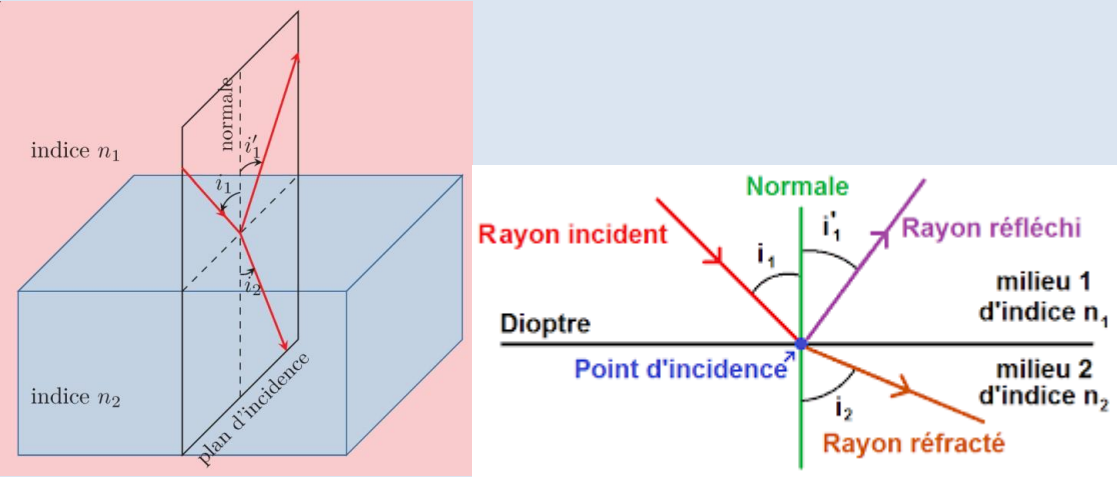
On observe qu'une partie de l'énergie lumineuse est transmise avec changement de direction et qu'une autre partie est réfléchie de façon symétrique.

Lorsqu'un rayon lumineux, dit incident, arrive sur un 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. Énoncé des lois

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

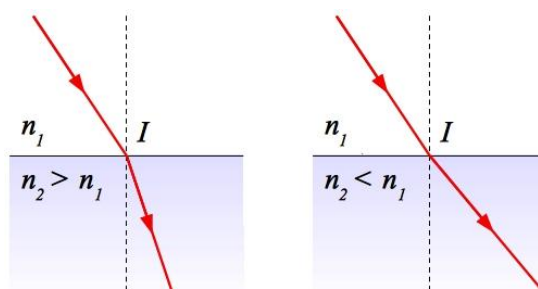
On définit la **normale** comme la droite perpendiculaire au dioptre au point d'incidence, point d'intersection entre le rayon incident et le dioptre. La normale et le rayon incident définissent le **plan d'incidence**.



- Les rayons réfléchis et réfractés appartiennent au plan d'incidence.
- Loi de la réflexion : Le rayon réfléchi est symétrique du rayon incident par rapport à la normale : $i_1' = i_1$
- Lois 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 ($i_2 = 0$).

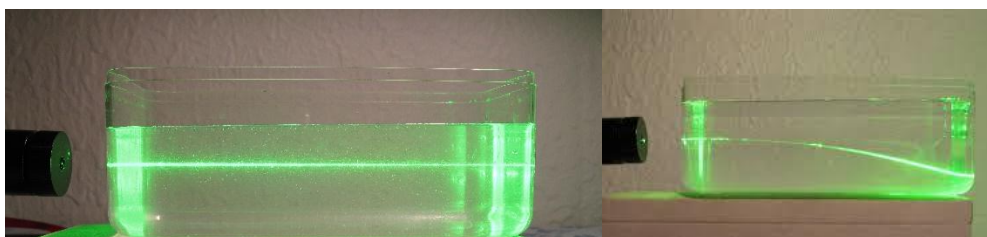
<https://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/optigeo/dioptreplan.html>

3. Réflexion totale

VI. Propagation de la lumière dans les milieux d'indice variable

1. Mise en évidence

Dans l'expérience à gauche l'eau est homogène. Dans l'expérience droite on a saturé l'eau en sucre. L'eau saturée en sucre n'est plus un milieu homogène puisque la concentration en sucre décroît avec l'altitude. On constate que le rayon n'est plus rectiligne : il est dévié vers le bas, vers les zones de fortes concentrations en sucre et de fort indice n .



Dans un milieu d'indice variable, le rayon lumineux se courbe dans le sens du gradient d'indice : c'est-à-dire « dans le sens des indices faibles vers les indices élevés ».

2. Mirages

L'indice n de l'air augmente lorsque sa température T diminue. Lorsque nos yeux (ou un appareil photo) reçoivent des rayons, ils les interprètent comme s'ils étaient rectilignes. Essayez d'interpréter les mirages ci-dessous...



<https://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/optigeo/mirage.html>