

III-1 PROPAGATION DE LA LUMIERE

Dans ce chapitre, on va étudier :

- Comment se propage la lumière dans différents milieux
- Les lois de Descartes

Introduction

L'optique est principalement l'ensemble des phénomènes perçus par l'œil. La cause de ces phénomènes, la lumière, a été étudiée très tôt dans l'histoire des sciences, au point que tous les principes sur lesquels reposent l'optique géométrique et l'optique ondulatoire sont connues depuis le XIX^{ème} siècle.

Le but de ce chapitre va être dans un premier temps de voir sous quelles conditions les lois de l'optique géométrique sont valables, ensuite nous poserons ces lois.

Mais dans un premier temps jetons un coup d'œil rapide sur l'historique de l'optique.

I – Fréquence et longueur d'onde

I-1) Les différents modèles

a) Modèle Géométrique

Avant le XVII^{ème} siècle, la nature de la lumière et sa propagation ne sont pas des questions essentielles. Cependant des notions de rayons lumineux et de retour inverse de la lumière permettent à Euclide (300 ans av. J.-C.) de poser les bases de l'optique géométrique.

Il faut attendre le XI^{ème} siècle pour qu'Alhazen, physicien arabe attribue à la lumière une origine extérieure à l'œil, définisse la notion d'images et interprète la formation des images dans l'œil.

Au XVII^{ème} siècle, Descartes, Fermat et Newton donnent à l'optique géométrique sa véritable grandeur ainsi Descartes énonce ces fameuses lois et propose un modèle corpusculaire, Fermat propose une optique basée sur un principe de moindre action et Newton publie en 1704 « optics » où ils présentent les lentilles, prismes et miroirs que nous verrons tout au long de ce cours.

b) Modèle Ondulatoire

Dès la fin du XVII^{ème} siècle, Huygens suggéra une théorie ondulatoire de la lumière permettant de retrouver les résultats de l'optique géométrique compatibles avec une vitesse de la lumière plus grande dans l'air que dans les milieux matériels. La découverte, les siècles suivant des phénomènes d'interférence de diffraction imposent cette théorie, suite aux travaux de Fresnel.

c) Modèle Corpusculaire

En 1906, Planck et Einstein reviennent à un modèle corpusculaire en introduisant des quantas d'énergie appelées photons : particules sans masse et d'énergie $\varepsilon = h\nu$ déplaçant à la célérité de la lumière.

Les deux modèles ondulatoires et corpusculaires, sont assez cohérents et se complètent.

Cette Dualité onde-corpuscule pour la lumière est alors généralisée aux particules dans la théorie de la mécanique quantique par : De Broglie, Bohr, Heisenberg et Schrödinger.

Les quelques contradictions entre les deux modèles ont pu être levé par l'électrodynamique quantique de Feynman, Schwinger et Tomonaga dans les années 50.

I-2) Périodicité spatiale et temporelle

La nature de la lumière fait l'objet d'un débat ancien : tour à tour, certains scientifiques ont affirmé le caractère corpusculaire de celle-ci, la considérant formé de particules ; puis d'autres ont proposé et établi son caractère ondulatoire. La physique

contemporaine unifie ces deux aspects dans la théorie quantique, on parle de dualité onde-corpuscule.

Dans la suite de ce chapitre, on privilégie la vision ondulatoire : c'est-à-dire que la lumière est décrite comme une onde électromagnétique. Elle est composée d'un champ électrique et d'un champ magnétique, notions qui seront définies plus tard. Une caractéristique qui distingue la lumière des ondes mécaniques (ondes acoustiques, sismiques...) est la possibilité de se propager sans milieu matériel : la lumière peut se propager dans le vide.

La lumière se propage dans le vide comme une onde de célérité c .

Le vide est linéaire (tout au moins dans le domaine de puissance accessible à l'expérimentation), on peut donc décomposer une onde électromagnétique en une somme de composantes variant sinusoïdalement dans le temps. Pour chacune d'entre elles, on parle d'onde monochromatique et on définit sa période T , sa fréquence $\nu = \frac{1}{T}$ et sa pulsation $\omega = \frac{1}{\nu} = \frac{2\pi}{T}$.

Chaque composante sinusoïdale se propageant dans le vide avec la célérité c , la donnée de ν , T ou ω impose la période spatiale λ_0 , appelée la longueur d'onde dans le vide.

On rappelle en effet que les périodes temporelle T et spatiale λ_0 sont liées par une relation simple, qui traduit le fait qu'en une durée T , l'ondulation se déplace de la distance λ_0 :

$$\lambda_0 = cT$$

On parle de longueur d'onde dans le vide.

I-3) Spectre de la lumière

Selon le domaine de fréquence ou de longueur d'onde qui lui correspond, une onde électromagnétique prend le nom d'onde radio, de lumière, de rayons X... ainsi que le récapitule la fresque suivante :

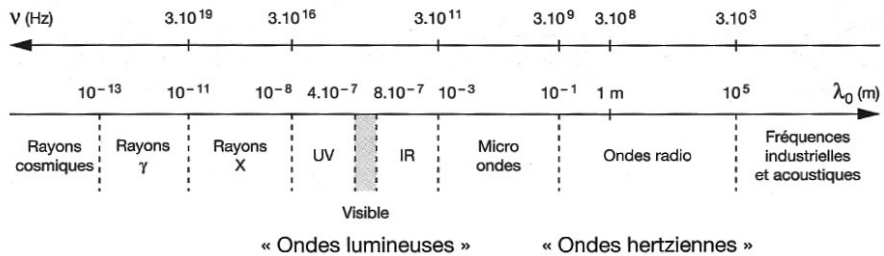


Figure 1

Le domaine de la lumière visible, quant à lui, s'étale de 400 nm à 750 nm, soit du violet au rouge, en se déclinant sur 7 teintes (nombre associé culturellement aux couleurs de l'arc-en-ciel) : violet, indigo, bleu, vert, jaune, orange, rouge.

De part et d'autre du domaine visible se situent l'ultraviolet (UV) et l'infrarouge (IR), dans lesquels l'optique met en œuvre des techniques très différentes de celles appliquées dans le visible, essentiellement pour des raisons de réalisations des composants d'instrumentation.

Quelques valeurs approximatives de longueur d'onde dans le vide peuvent être retenues, en lien avec la couleur du rayonnement associé :

Violet	Bleu	Vert	Jaune	Rouge
400 nm	440 nm	550 nm	590 nm	630 nm

II-Sources de lumière

II-1) Lampe spectrale

Très utilisées au laboratoire, pour les raisons que nous allons décrire ci-dessous, les lampes spectrales sont constituées d'une ampoule renfermant une vapeur atomique. Les propriétés de la lumière émise dépendent essentiellement de l'élément chimique concerné, on le précise dans le nom de la lampe : on parle ainsi de lampe à vapeur d'hydrogène, de mercure ou de sodium...

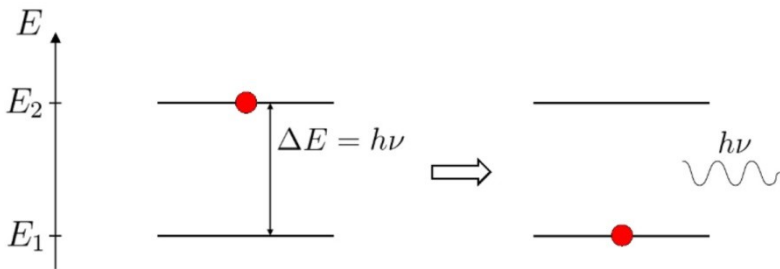
Une excitation électrique à haute tension appliquée entre les électrodes modifie l'état de cette vapeur, dont les atomes s'agitent fortement. Excités lors de très nombreuses collisions, les atomes de la vapeur atteignent temporairement des niveaux d'énergie plus élevés que ceux de l'état fondamental. Lorsqu'ils se dés excitent, c'est-à-dire lorsqu'ils regagnent un état d'énergie plus faible, les atomes émettent des grains de lumière, appelés photons, dont la fréquence ν ne peut prendre que des valeurs particulières.

En effet, les niveaux d'énergie E_n des atomes sont quantifiés par un entier n à l'instar des modes d'oscillation d'une corde vibrante. Le principe de conservation de l'énergie impose que l'énergie d'un photon émis ne puisse prendre qu'une valeur égale à la différence de deux niveaux d'énergie de l'atome :

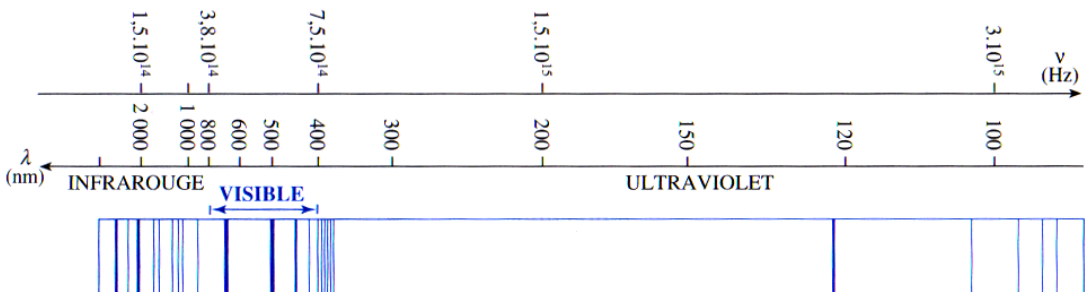
$$E = E_n - E_p \text{ où } n \text{ et } p \text{ sont des nombres entiers.}$$

Or l'énergie E d'un photon est liée à sa fréquence ν par la relation $E = h\nu$, où h est la constante de Planck $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s, donc ν ne peut prendre que des valeurs discrètes :

$$\nu = \frac{E_n - E_p}{h}$$



Le spectre d'une lampe à vapeur atomique (ici hydrogène), observé dans un spectromètre, présente donc des raies fines et isolées les unes des autres, on parle de spectre discret, ou spectre de raies.



Le spectre est donc une signature de l'élément chimique, avec des applications importantes dans l'étude de la physique atomique.

Pour l'opticien, l'intérêt est de disposer d'un rayonnement composé de quelques fréquences connues avec précision. Un système de filtres permet en outre de sélectionner une raie parmi tout un spectre discret et donc d'obtenir aisément un rayonnement que l'on appelle monochromatique, qui présente une dépendance sinusoïdale du temps de fréquence précise et reproductible.

L'association d'une lampe à vapeur de mercure et d'un filtre interférentiel vert de 540nm permettra d'isoler la raie verte du mercure à 546nm

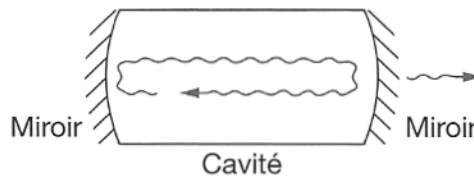
Raie bleue	Raie verte	Doublet jaune	Raie rouge
du mercure	du mercure	du sodium	du cadmium
(Hg)	(Hg)	(Na)	(Cd)
436 nm	546 nm	589 nm	644 nm

II-2) Le LASER

La source de rayonnement monochromatique reine est néanmoins, au laboratoire et dans de nombreux domaines de la vie courante, le LASER. Ce sigle, mis pour Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (**ou amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement**), traduit un phénomène qui est au cœur du principe de fonctionnement du LASER.

Schématiquement, un LASER comporte une cavité dans laquelle une onde lumineuse effectue des allers-retours. Elle est amplifiée à chaque traversée d'un milieu amplificateur, afin de

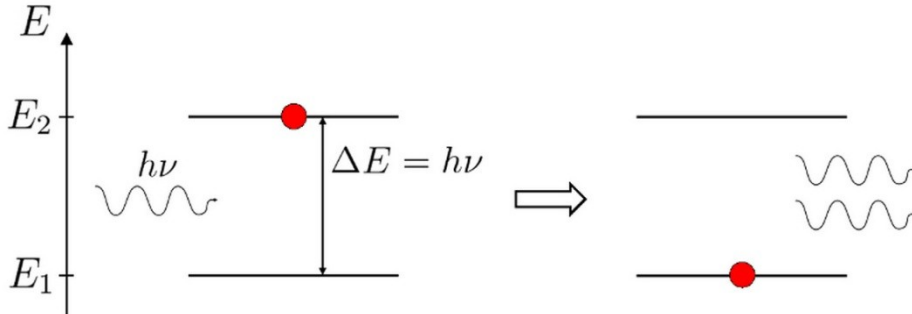
compenser les pertes qui se produisent lors des réflexions (entre autres par le fait que de la lumière sort de la cavité, pour être utilisée à l'extérieur). Lorsque cet équilibre entre l'amplification par le milieu et l'atténuation par les réflexions est respecté, on aboutit à un mode entretenu de vibration du LASER.



Toute la difficulté du procédé, qui n'a été maîtrisé que dans la seconde moitié du siècle dernier, repose dans l'obtention d'une amplification de lumière. En effet, un grain de lumière qui rencontre un atome peut être absorbé, ce qui va dans le sens d'une atténuation de l'onde lumineuse et il peut être émis lors de la désexcitation ultérieure de l'atome, comme ce qui a été décrit pour les lampes spectrales. Mais ce jeu d'absorption-émission spontanée ne permet pas d'amplification.

Il faut, pour ce faire, favoriser les conditions d'une émission induite, dans laquelle l'interaction du photon incident et d'un atome excité produit l'émission d'un second photon, en phase avec le premier. Ce phénomène, d'abord prédit théoriquement, a pu être favorisé en réunissant des conditions très particulières, dans lesquelles une assemblée nombreuse d'atomes excités est en permanence présentée au

rayonnement lumineux, afin que l'émission stimulée l'emporte sur l'absorption.

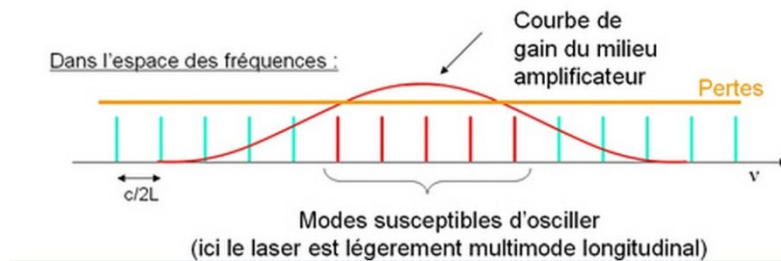


Emission induite d'un photon : Si l'atome se trouve sur un niveau excité et qu'il reçoit un photon, il peut émettre un deuxième photon, strictement identique au photon incident, et passer sur le niveau d'énergie inférieure. C'est d'ailleurs cette propriété qui est à la base du fonctionnement des LASER.

Cette production d'un état non naturel qualifié d'inversion de population, où les atomes excités sont plus nombreux que les atomes au repos, nécessite un apport permanent d'énergie. De ce fait, il n'y a pas de génération spontanée d'énergie : le rayonnement LASER créé possède une puissance qui est bien inférieure à celle qui est nécessaire pour entretenir l'inversion de population dans la cavité.

D'un point de vue spectral, la cavité joue un rôle analogue à celui de la corde vibrante, en n'oscillant qu'à des fréquences discrètes, fonctions de sa longueur et de la célérité des ondes. D'autre part, l'amplification de lumière ne peut avoir lieu que dans un domaine étroit de fréquence. Ces deux

propriétés jointes donnent au rayonnement LASER un caractère quasi monochromatique. Pour les applications courantes, un LASER Hélium-Néon tel que celui présent dans le laboratoire de travaux pratiques délivre une lumière rouge de longueur d'onde $\lambda=632,8$ nm.



II-3) Lampe à incandescence

Après l'obtention d'un spectre de raies discrètes, puis d'ondes monochromatiques, intéressons-nous à un procédé générant un rayonnement polychromatique à spectre continu et large, c'est-à-dire couvrant tout le visible.

Un filament métallique placé dans une atmosphère inerte, dépourvue de dioxygène, peut être porté à haute température sans subir de combustion. On choisit bien entendu un métal dont la température de fusion est supérieure à celle utilisée, afin qu'il reste à l'état solide afin qu'il reste à l'état solide. Porté ainsi à une température supérieure à 2 500 K, le filament émet un rayonnement visible, c'est-à-dire dont une partie du spectre entre dans l'intervalle [400 nm, 750 nm].

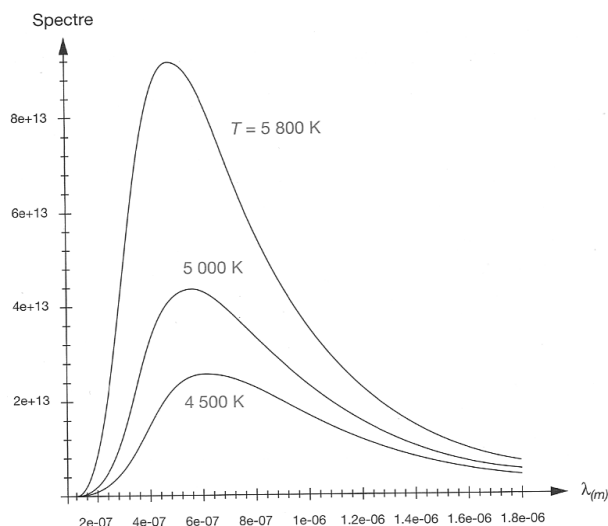
Ce procédé permet d'obtenir un rayonnement visible de manière très économique, c'est ce qui explique qu'il a été très utilisé

dans l'éclairage domestique depuis la fin du 19^{ème} siècle. Son rendement jugé trop faible a conduit à lui préférer, depuis quelques années, des ampoules à basse consommation. **Du point de vue du phénomène physique en jeu dans l'émission d'une lampe à incandescence, c'est à l'agitation des particules chargées que l'on doit la production d'ondes électromagnétiques. On parle de rayonnement thermique**, ce qui donne une totale parenté entre l'émission par une lampe à incandescence et la production de lumière à la surface du Soleil !

Seule la température change, ce qui a comme conséquence que le spectre du rayonnement d'une lampe n'est pas situé dans le même domaine spectral que celui du Soleil, bien que les allures des deux spectres soient similaires. Alors que le spectre solaire de température caractéristique 5 800 K est centré dans le visible, celui d'une lampe à incandescence a son maximum d'émission dans l'infrarouge proche.

Le maximum de lumière émis est régi par la loi de Wien :

$$\lambda_M T = 2898 \mu\text{m.K}$$



III – Indice d'un milieu transparent

III-1) Indice d'un milieu

La lumière se propage dans le vide, mais aussi dans une grande variété de milieux que l'on qualifie de transparents : air, eau, verre...

Les qualificatifs qui conviennent pour ces milieux sont multiples, il est bon d'en connaître la définition. **On parle ainsi de milieu transparent :**

- **Linéaire, lorsque la propagation d'une onde sinusoïdale de pulsation reste sinusoïdale de même pulsation.**
- **Homogène, lorsque les propriétés sont les mêmes en tout point ;**
- **Isotrope, lorsque toutes les directions sont équivalentes.**

Dans toute la suite, sauf précision contraire, les milieux transparents envisagés seront linéaires, homogènes et isotropes

A l'instar du vide, l'air, l'eau et le verre sont des milieux transparents linéaires, homogènes et isotropes.

Ils ne se distinguent que par la célérité de la lumière. Si l'on note v cette vitesse (la lettre c est réservée à la célérité dans le vide), on peut définir un nombre sans dimension, appelé indice du milieu :

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

La valeur supérieure à 1 de l'indice indique que la lumière se propage moins vite dans un milieu matériel que dans le vide.

Vide : $n=1$

Air : $n=1,0003 \approx 1$

Eau : $n=1,33$

Verre : $n \approx 1,5$

III-2) Longueur d'onde

Une source lumineuse polychromatique émet un rayonnement caractérisé par son spectre. Chacune des composantes monochromatiques est définie par sa fréquence ν , donc sa période temporelle T et sa pulsation ω . Ces grandeurs sont invariantes, quel que soit le milieu dans lequel s'effectue la propagation.

Lorsqu'une onde sinusoïdale traverse un milieu matériel transparent, sa vitesse de propagation dépend de l'indice n , donc sa longueur d'onde n'est plus la même que dans le vide : $\lambda \neq \lambda_0$

$$\text{En effet : } \lambda = \nu T = \frac{c}{n} T \Leftrightarrow \lambda = \frac{c}{n\nu} \Leftrightarrow \lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

III-3) Dispersion et absorption

a) Dispersion

La réponse des milieux matériels dépend de leur structure et notamment du type de particules qui les composent et de leurs liaisons. Chaque milieu présente donc un comportement spécifique lorsqu'on lui applique une onde lumineuse.

En outre, le temps caractéristique d'évolution des particules du milieu intervient, ce qui explique que la réponse soit différente selon la période de l'onde lumineuse.

Contrairement au cas du vide, la vitesse de propagation de la lumière est fonction de la fréquence de l'onde. On parle de dispersion d'où $n=f(\lambda_0)$

Pour les verres n vérifie la loi de Cauchy : $n = A + \frac{B}{\lambda_0^2}$ où A et B sont des constantes dépendant du verre utilisée

b) Absorption

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

IV - Approximation de l'optique géométrique et rayon lumineux

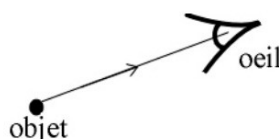
IV-1) Notion de rayon lumineux

a) Propagation rectiligne

L'expérience montre que, dans un milieu homogène et isotrope, la lumière se propage en ligne droite : si on observe par exemple un point particulier d'un objet et que l'on interpose un obstacle entre l'œil et ce point, on ne le voit plus. On en déduit facilement que la lumière, qui va du point à l'œil, a suivi un segment de droite.

Pour matérialiser la propagation rectiligne, on représente des « rayons lumineux » sous forme de droites issues de la source, une flèche indiquant le sens de propagation de la lumière.

Un rayon lumineux n'a pas d'existence physique (on ne peut observer de rayon unique, c'est un modèle qui permet de décrire la formation des images



b) La diffraction

Un laser fourni pratiquement en rayon lumineux : si l'on fait fonctionner laser dans l'obscurité, on peut visualiser et le rayon lumineux. En fait si ce rayon évoque une droite, il a malgré tout de Dinant une dimension transversale finit. On peut alors se demander s'il est aussi d'isoler rayon lumineux.

Pour se faire plaçons un diaphragme réglable à la sortie du laser ; si l'on rétrécit trop l'ouverture du diaphragme, la trace du faisceau sur un écran E donne une tâche qui s'élargit à la mesure que l'on diminue a : ce phénomène porte le nom de diffraction. L'élargissement du faisceau laser, dans les conditions que nous venons d'évoquer, se caractérise par un étalement angulaire ε dont l'expérience permet d'écrire :

$$\sin(\theta) \approx \theta = \frac{\lambda_0}{d}$$

\Rightarrow on ne peut donc pas isoler un rayon lumineux.

On peut cependant considérer qu'un faisceau de lumière est formée de rayons lumineux, l'étude de la marche de ses rayons constituant le but de l'optique géométrique.

\Rightarrow Le rayon lumineux est un modèle

IV-2) L'approximation de l'optique géométrique

L'étude de l'optique géométrique suppose que les grandeurs caractéristiques du milieu qui limitent les faisceaux ont des dimensions très supérieures à la longueur d'onde:

$$d \gg \lambda_0.$$

IV-3) Milieu transparent

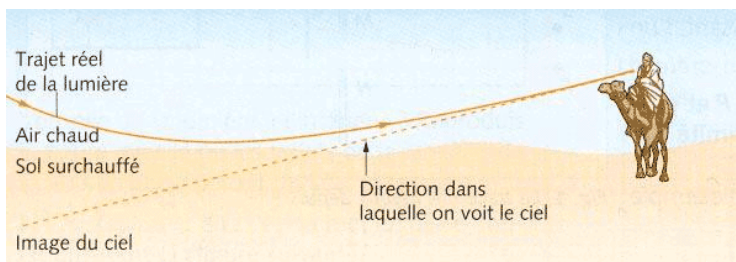
a) Milieu LHI

Dans un milieu transparent linéaire homogène et isotrope la lumière se propage rectilignement.

b) Milieu non LHI

La lumière ne se propage pas tout le temps en ligne droite. Par exemple dans les milieux non homogènes, le rayon lumineux devient courbé.

Par exemple l'air peut-être rendu non homogène à cause d'une différence de température appelée gradient de température entre le sol et les altitudes plus élevées. Cela permet d'expliquer les mirages.



IV-4) Principe de Fermat

Pour aller d'un point A à un point B la lumière emprunte le chemin de plus courte durée.

$$\text{Or } \tau = \frac{AB}{v} = n \frac{AB}{c}$$

Si le milieu est homogène n ne dépend pas de la position, et par conséquent minimiser la durée correspond à minimiser la distance (AB).

On retrouve le fait que dans un LHI, la lumière se propage en ligne droite.

Remarque :

La grandeur $n \cdot AB$ est appelée chemin optique entre A et B dans le milieu d'indice n

IV-5) Indépendance des rayons lumineux

Nous supposerons dans la suite que **le cheminement des différents rayons lumineux traversant un instrument d'optique sont indépendants** : c'est l'hypothèse de l'indépendance des rayons lumineux.

V – Les Lois de Descartes

V-1) Définitions

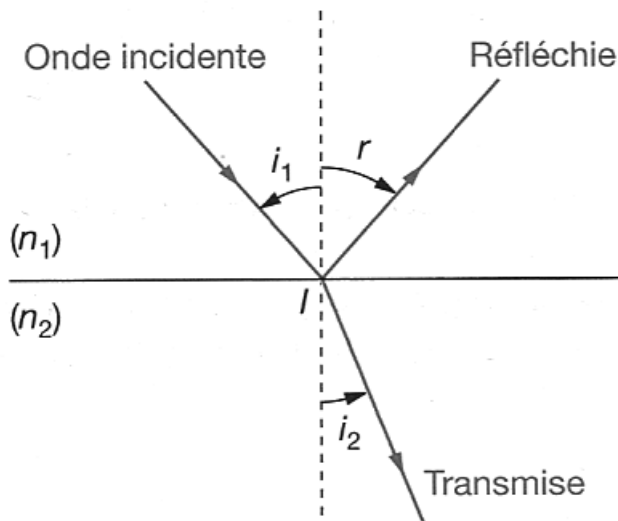
a) Dioptre

On appelle dioptre la surface de séparation entre deux milieux d'indice différents

b) Réflexion et réfraction d'un milieu lumineux

- Le plan défini par la normale et le rayon incident est par définition le plan d'incidence
- Dans le cas où la surface de séparation est un miroir il y a réflexion.
- Dans le cas où la surface de séparation est un dioptre, il y a réflexion et réfraction

V-2) Lois de Descartes



a) Enoncé

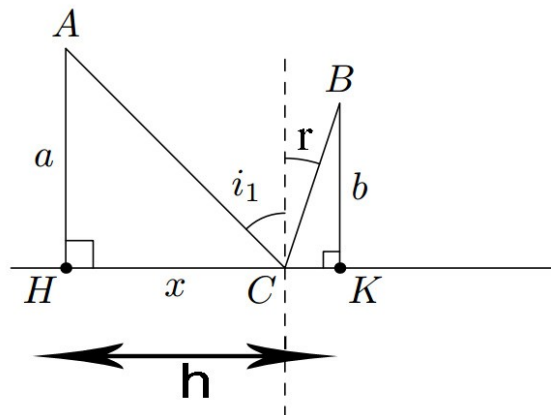
- Les rayons réfléchi et réfracté sont dans le plan d'incidence
- L'angle de réflexion est égale à l'angle d'incidence : $i_1 = r$
- L'angle de réfraction i_2 est lié a i_1 par : $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$

b) Principe de Fermat pour la réflexion

Ces loi peut être vue comme empirique, c'est-à-dire issue de l'expérience et ce fut le cas historiquement, mais on peut également chercher à l'interpréter. Utilisons le principe de Fermat.

En effet, la durée nécessaire à la lumière pour aller d'un point A (la source du rayonnement) à un point B, avec réflexion en I s'écrit :

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{AI}{v_1} + \frac{IB}{v_1} = \frac{n_1}{c} (AI + IB) \\ &= \frac{n_1}{c} \left(\sqrt{a^2 + x^2} + \sqrt{b^2 + (h - x)^2} \right) \end{aligned}$$



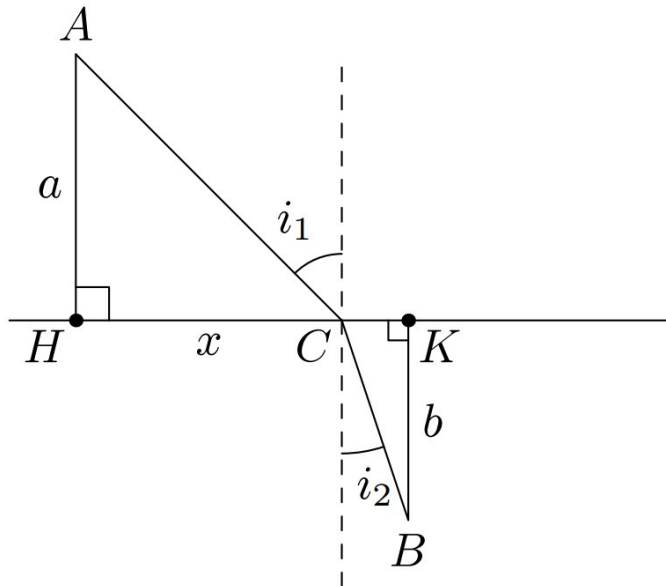
Or si le temps est minimal on a : $\frac{d\tau}{dx} = 0$

$$\Leftrightarrow \frac{x}{\sqrt{a^2 + x^2}} - \frac{h - x}{\sqrt{b^2 + (h - x)^2}} = 0$$

$$\Leftrightarrow \sin(i_1) - \sin(r) = 0$$

D'où : $i_1 = r$

c) Principe de Fermat pour la réfraction



$$\tau = \frac{AC}{v_1} + \frac{CB}{v_2} = \frac{1}{c} (n_1 AC + n_2 CB)$$

$$= \frac{1}{c} \left(n_1 \sqrt{a^2 + x^2} + n_2 \sqrt{b^2 + (h - x)^2} \right)$$

Or si le temps est minimal on a :

$$\frac{d\tau}{dx} = 0 \Leftrightarrow n_1 \frac{x}{\sqrt{a^2+x^2}} - n_2 \frac{h-x}{\sqrt{b^2+(h-x)^2}} = 0$$

$$\Leftrightarrow n_1 \sin(i_1) - n_2 \sin(i_2) = 0$$

Donc $n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$

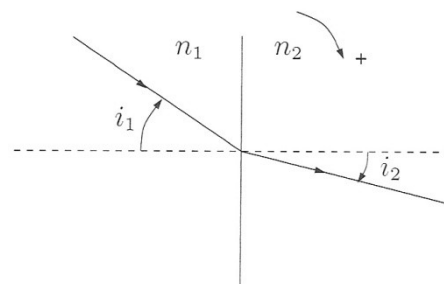
V-3) Principe de retour inverse de la lumière

Les lois de Descartes obéissent au principe de retour inverse de la lumière : tout trajet suivi par la lumière dans un sens peut l'être en sens opposé.

V - Réfraction limite et réflexion totale

V-1) Réfraction limite ($n_1 < n_2$)

Dans le cas où le milieu 2 est plus réfringent que le milieu 1, le faisceau va se rapprocher donc i peut varier de 0 à $\pi/2$.



Réfraction avec un milieu (2) plus réfringent.

$$\text{Soit } n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2) \Leftrightarrow \sin(i_1) = \frac{n_2}{n_1} \sin(i_2)$$

$$\text{Or } 0 \leq i_1 \leq \frac{\pi}{2} \Rightarrow 0 \leq \sin(i_1) \leq 1$$

$$\Rightarrow 0 \leq \frac{n_2}{n_1} \sin(i_2) \leq 1$$

$$\Rightarrow 0 \leq \sin(i_2) \leq \frac{n_1}{n_2}$$

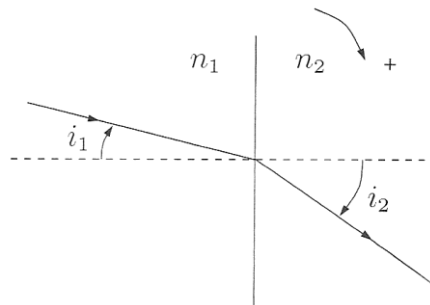
$$\Rightarrow 0 \leq i_2 \leq \text{Arcsin} \left(\frac{n_1}{n_2} \right) = i_{2, \text{lim}}$$

: **angle de refraction limite.**

\Rightarrow Les rayons réfractés sont tous situés à l'intérieur d'un cône de réfraction de demi-angle au sommet $i_{2, \text{lim}}$.

V-2) Réflexion totale ($n_1 > n_2$)

a) Angle de réflexion totale



Réfraction avec un milieu 2 moins réfringent.

Dans le cas où le milieu 1 est plus réfringent que le milieu 2, le faisceau va s'éloigner donc i_2 peut varier de 0 à $\pi/2$.

$$\text{Soit } n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2) \Leftrightarrow \sin(i_2) = \frac{n_1}{n_2} \sin(i_1)$$

$$\text{Or } 0 \leq i_2 \leq \frac{\pi}{2} \Rightarrow 0 \leq \sin(i_2) \leq 1$$

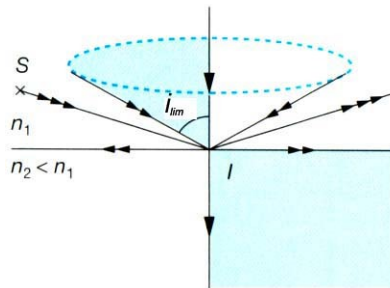
$$\Rightarrow 0 \leq \frac{n_1}{n_2} \sin(i_1) \leq 1$$

$$\Rightarrow 0 \leq \sin(i_1) \leq \frac{n_2}{n_1}$$

$$\Rightarrow 0 \leq i_1 \leq \text{Arcsin} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) = i_{1,lim}$$

: **angle de réflexion totale.**

Donc tout rayon incident tel que $i_1 > i_{1,lim}$ ne peut-être réfracté et subit donc une réflexion totale



La limite de la réflexion totale est atteinte lorsque le rayon réfracté est rasant, c'est-à-dire pour i_2 droit.

b) Applications

La réflexion totale sert à canaliser la lumière :

- tube en matière souple : endoscope
- fibres optiques
- lampes décoratives...

