

Chapitre Op1 – Optique : Bases de l'optique géométrique

Introduction

Depuis l'Antiquité, la lumière a suscité de nombreuses interrogations, les premières théories ayant été développées en Grèce. Les partisans de la "théorie atomique" y voyaient des minuscules particules d'"écorce" d'objets envoyées vers l'œil à très grande vitesse. C'est le médecin et mathématicien arabe ALHAZEN qui, le premier, pose formellement les bases de la théorie des rayons lumineux en 1021 dans son *Traité d'Optique*, après que la notion de eut été introduite par Euclide au III^e siècle avant J.-C. Ces bases seront ensuite reprises et développées, notamment aux XVI^e et XVII^e siècles avec l'apparition des premiers instruments d'observation astronomique sous l'impulsion de GALILÉE, KEPLER et TYCHO BRAHÉ. L'**optique géométrique**, au programme de première année, porte sur l'étude des rayons lumineux et de la formation des images par des instruments d'optique.

La nature même de la lumière a fait débat pendant longtemps, en particulier aux XVII^e et XVIII^e siècles. NEWTON défendait l'idée que les objets lumineux émettent des corpuscules qui se déplacent selon les lois de la mécanique, alors que HUYGENS affirmait de son côté que la lumière était une onde. Les expériences réalisées par FRESNEL et YOUNG au début du XIX^e siècle ont temporairement permis de clore le débat : leur mise en évidence des interférences lumineuses confirmait la nature ondulatoire de la lumière. Il ne restait plus qu'à identifier les grandeurs correspondant aux ondes lumineuses, ce qu'a fait MAXWELL à la fin du XIX^e en théorisant l'existence des ondes électromagnétiques, suivi par la confirmation expérimentale avec les travaux de HERTZ. La lumière serait donc une onde électromagnétique, portée par les variations du champ électrique et du champ magnétique. L'**optique physique ou ondulatoire**, au programme de deuxième année, s'intéresse aux phénomènes vibratoires et à la nature ondulatoire de la lumière.

Les travaux de PLANCK sur le corps noir à la toute fin du XIX^e siècle puis l'avènement de la mécanique quantique dans le courant du XX^e ont généré un retour sur cette affirmation catégorique avec la découverte des photons, corpuscules de lumière. On sait aujourd'hui que ces deux natures ne sont pas contradictoires : c'est la dualité onde-corpuscule. Nous nous intéresserons à l'**aspect corpusculaire de la lumière** dans un chapitre ultérieur.

Objectifs du chapitre

- Décrire les sources lumineuses et introduire le modèle de la source ponctuelle monochromatique.
- Décrire le comportement de la lumière dans un milieu transparent à l'aide de son indice.
- Définir l'approximation de l'optique géométrique et la notion de rayon lumineux.
- Énoncer et utiliser les lois de DESCARTES pour la réflexion et la réfraction à l'interface entre deux milieux.

Capacités exigibles

Capacités exigibles	Validé ?
Caractériser une source lumineuse par son spectre	
Établir la relation entre la longueur d'onde dans le vide et dans un milieu.	
Utiliser l'expression reliant l'énergie d'un photon à la fréquence.	
Utiliser la relation $\theta \simeq \lambda/a$ entre l'échelle angulaire du phénomène de diffraction et la taille caractéristique de l'ouverture.	
Définir le modèle de l'optique géométrique et indiquer ses limites.	
Utiliser les lois de DESCARTES pour la réflexion et la réfraction.	
Établir la condition de réflexion totale.	

ALHAZEN (XI^e siècle)

Johannes KEPLER (1610)



René DESCARTES (1640)



Christian HUYGENS (1671)



Augustin FRESNEL (1810)

I Ondes et sources lumineuses

I.1 Onde lumineuse dans le vide

Définition – Onde lumineuse

La lumière est une **onde électromagnétique** (combinaison d'un champ électrique \vec{E} et d'un champ magnétique \vec{B}) capable de se propager dans le vide à la **célérité de la lumière** $c = 3,00.10^8 \text{ m.s}^{-1}$.
 Il s'agit d'une grandeur vectorielle capable de **transporter de l'énergie** en se **propageant**.

Remarques : en toute rigueur, $c = 299\,792\,458 \text{ m.s}^{-1}$. On appelle généralement **ondes lumineuses** les gammes UV, visible et IR.

Définition – Onde monochromatique

- Une onde lumineuse sinusoïdale de fréquence f est appelée **onde lumineuse monochromatique**. Elle est caractérisée par une période temporelle $T = \frac{1}{f}$ ainsi qu'une **longueur d'onde** dans le vide $\lambda_0 = cT = \frac{c}{f}$.
- La **lumière visible** correspond aux longueurs d'onde dans le vide : $400 \text{ nm} \leq \lambda_0 \leq 800 \text{ nm}$.
 Pour les fréquences : $3,75.10^{14} \text{ Hz} \leq f \leq 7,5.10^{14} \text{ Hz}$ soit environ 600 THz.

Couleur	Violet	Bleu	Vert	Jaune	Rouge
λ_0 (nm)	450	500	550	600	650
f (THz)	666	600	545	500	461

- Deux ondes de fréquences différentes ne sont pas synchrones et n'interagissent pas entre elles.

I.2 Aspect particulière de la lumière : le photon

Définition – Le photon

Le principe de dualité onde-particule pour la lumière stipule que l'énergie lumineuse est transportée par "paquets quantifiés", des quantas de lumière. La particule associée à la lumière est appelée **photon**, parfois noté γ .

- Il possède une masse nulle, il se déplace à la vitesse de la lumière ($c = 3,00.10^8 \text{ m.s}^{-1}$ dans le vide)
- L'énergie d'un photon associé à un rayonnement de fréquence f (longueur d'onde $\lambda_0 = c/f$) vaut

$$E_\gamma = hf = \frac{hc}{\lambda_0} \text{ où } h = 6,64.10^{-34} \text{ J.s est la constante de PLANCK.}$$

O.d.g. : On compte souvent l'énergie des photons en électron-volts : $1 \text{ eV} = 1,6.10^{-19} \text{ J}$.

Rayonnement visible : $E = 1,5 - 3 \text{ eV}$, UV : $E = 3 - 125 \text{ eV}$, rayons X : $E = 125 - 60 \text{ keV}$, IR : $E = 4.10^{-3} - 1,5 \text{ eV}$ et hertzien : $E < 4.10^{-3} \text{ eV}$.

Remarque : L'énergie transportée par un photon ne dépend que de la fréquence. Pour caractériser la **puissance lumineuse** d'une source (en watts), il faut donc savoir combien de photons sont émis par seconde : on parle de **flux de photons** ou débit de photons, en photons/s ou Hz. Plus une source est lumineuse, plus le flux est important.

Exemple ou exercice d'application – Nombre de photons dans un faisceau laser

Un laser hélium-néon d'une puissance $\mathcal{P} = 1 \text{ mW}$ émet une rayonnement le longueur d'onde $\lambda = 633 \text{ nm}$.

1. Calculer l'énergie E_γ puis le flux ϕ_γ des photons, s'exprimant en fonction de \mathcal{P} et E_γ . Quelle durée Δt sépare en moyenne l'émission de deux photons successifs ?
2. Sachant que les détecteurs contemporains atteignent des résolutions temporelles de l'ordre de 10^{-7} s , à quelle puissance faudrait-il descendre pour espérer détecter des photons uniques ?

Définition – Rayon lumineux

Un **rayon lumineux** est une ligne le long de laquelle l'onde lumineuse se propage. Il s'agit de la trajectoire suivie par l'énergie lumineuse ou, dans l'approche corpusculaire, par les photons. Un **faisceau lumineux** est un ensemble de rayons lumineux.

I.3 Onde lumineuse dans les milieux transparents

3.a Milieux MLTHI

Le cours de première année se limite à l'étude de la propagation de la lumière dans un type particulier de milieux : les milieux linéaires, transparents, homogènes et isotropes (MLTHI).

Définition – MLTHI

Les milieux linéaires, transparents, homogènes, et isotropes (MLTHI) sont :

- **linéaires** : le principe de superposition s'applique et la fréquence d'une onde monochromatique n'est pas modifiée au cours de la propagation.
- **transparents** : il n'absorbent pas l'énergie lumineuse visible.
Contre ex. : liquides colorés.
- **homogènes** : leurs propriétés physico-chimiques sont les mêmes en tous points du matériau.
Contre ex. : milieux de densité variable \Rightarrow mirages.
- **isotropes** : les propriétés de la propagation lumineuse sont les mêmes dans toutes les directions.
Contre ex. : les cristaux.

Remarque : les milieux transparents le sont généralement sur une plage réduite de fréquences et pas sur tout le spectre lumineux. Par exemple, l'eau absorbe faiblement le rayonnement rouge et IR et le verre absorbe les UV.

Propriété – Célérité dans un MLTHI

- Dans un MLTHI, les ondes lumineuses se propagent plus lentement que dans le vide, à la célérité $v = \frac{c}{n}$ où

$n \geq 1$ est l'**indice optique** du milieu.

Vide	Air sec 0°C	Eau	Verres	Diamant
1	1,00029	1,33	1,5 à 1,7	2,42

- Plus l'indice est élevé, plus on dit que le milieu est **réfringent**.
- Dans un MLTHI d'indice n , l'onde lumineuse **conserve sa fréquence** mais, comme elle se propage moins vite, sa longueur d'onde est diminuée $\lambda = vT = \frac{\lambda_0}{n}$.

Remarque : les propriétés des MLTHI correspondent à des caractéristiques de l'indice :

- Transparent : l'indice optique est réel
- Homogène : l'indice optique est le même en tous points du matériau.
- Isotrope : l'indice est le même dans toutes les directions de propagation.

3.b Milieux dispersifs

Définition – Dispersion

Dans un MLTHI, l'indice optique est le même en tout point mais il dépend généralement de la fréquence de l'onde (de la couleur). Lorsque l'**indice optique** $n(\lambda_0)$ **dépend de la longueur d'onde** dans le vide λ_0 (donc dépend de la fréquence f), on dit que le milieu est **dispersif**

Propriété – (HP) Formule de CAUCHY

De nombreux matériaux, notamment le verre, vérifient la formule empirique de Cauchy : $n(\lambda_0) = A + \frac{B}{\lambda_0^2}$ où

A et B sont des constantes, dépendantes du milieu, et λ_0 la longueur d'onde dans le vide.

Odg : $A \simeq 1,5$ et $B \simeq 5.10^{-15} \text{ m}^2$.

Remarque : cette propriété est utilisée pour décomposer la lumière blanche, notamment à l'aide de verre taillé en forme de prisme. https://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/optiqueGeo/prisme/prisme.php

I.4 Sources de lumière et spectre lumineux

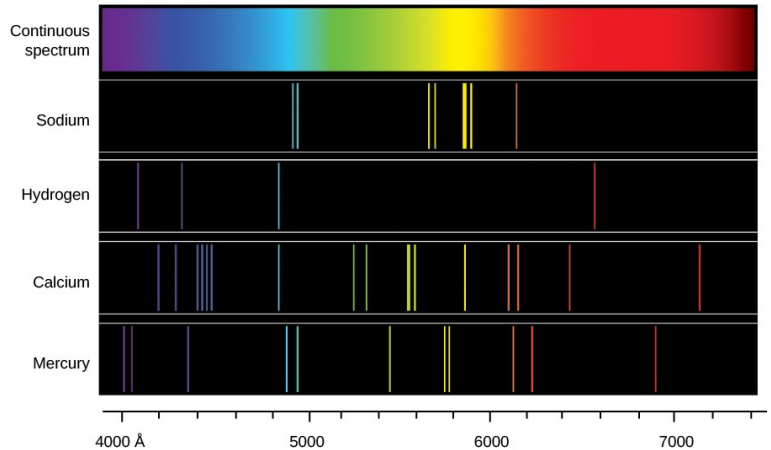
Définition – Spectre lumineux

- La plupart des sources de lumière n'émettent pas qu'une onde monochromatique mais plutôt une superposition d'ondes à plusieurs fréquences. L'ensemble des fréquences émises est appelé son **spectre lumineux**.
- Pour une source donnée, il est courant de tracer l'"intensité lumineuse" $I(\lambda)$ de chaque composante du spectre en fonction de la longueur d'onde d'émission : on parle de **spectre en intensité**.

Dans le monde physique, on distingue deux types de sources : celles qui émettent un spectre discret (discontinu) et celle qui émettent un spectre continu.

4.a Spectre discret - sources atomiques

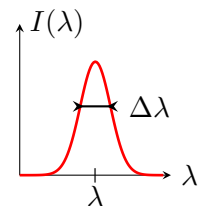
• Les **lampes spectrales** sont constituées d'une ampoule renfermant une vapeur atomique. Des décharges électriques ont lieu à l'intérieur de l'ampoule contenant le gaz atomique, agitant les atomes et forçant des transitions électroniques vers des états excités. C'est la désexcitation des atomes qui est responsable de l'émission de lumière. Une telle lampe émet une série de longueurs d'ondes caractéristiques de l'élément. Son spectre est constitué de pics fins appelés **raies spectrales**, caractéristiques de l'élément chimique.



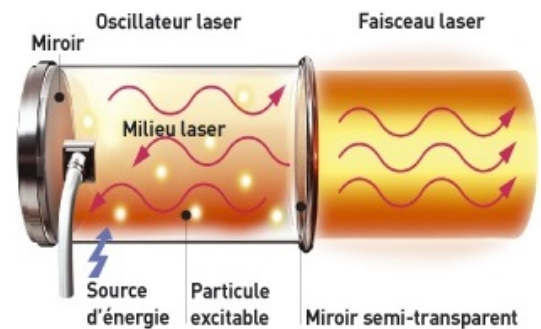
Exemples : Lampe à vapeur de mercure en TP. Les éclairages publics jaune-orangés sont des lampes à vapeur de sodium. Les tubes fluorescents utilisent la forte émission UV du mercure pour éclairer la poudre fluorescente qui recouvre l'intérieur du tube. Cette dernière rayonne ensuite une lumière quasi-blanche. ⚠ La dénomination "tube néon" est fautive. Les lampes néon existent, mais elles produisent une lumière rouge.

http://www.ostralo.net/3_animations/swf/spectres_abs_em.swf

Remarque : Les raies spectrales atomiques ne sont pas infiniment fines mais présentent une certaine largeur $\Delta\lambda$, principalement due à l'effet DOPPLER résultant du mouvement des atomes ainsi qu'aux collisions entre atomes. Plus la largeur $\Delta\lambda$ est petite, plus la source peut être considérée monochromatique. **Odg :** Pour une lampe spectrale : $\Delta\lambda \approx 0,1 \text{ nm}$.



• De nos jours, la source monochromatique reine est le **LASER** (acronyme de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiations*). Un laser est constitué d'une cavité optique, au sein de laquelle les ondes lumineuses effectuent des allers-retours, et d'un milieu amplificateur permettant d'augmenter l'intensité lumineuse à chaque aller-retour. Un des miroirs de la cavité est semi-transparent, ce qui permet à un faisceau d'émerger. La couleur du LASER dépend donc de la nature du milieu amplificateur et la finesse des raies dépend de la forme de la cavité. La principale difficulté du procédé réside dans l'obtention d'un milieu amplificateur de lumière.



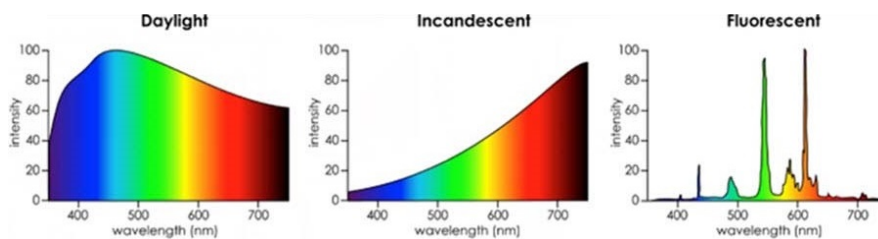
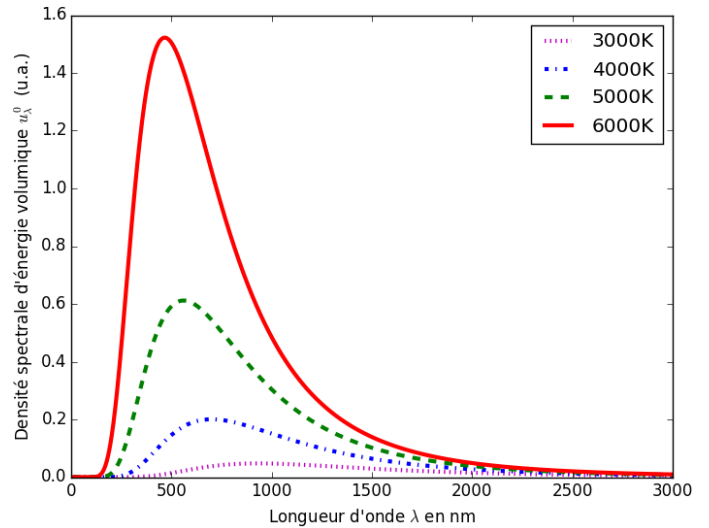
Odg : Pour un laser, la monochromaticité est meilleure et on peut atteindre une variation relative de l'ordre du millionième $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx 10^{-6}$.

Exemples : Laser à gaz He – Ne $\lambda = 632,8 \text{ nm}$. Laser solide Nd – YAG (grenat d'yttrium et gallium dopé au néodyme) à $\lambda = 1064 \text{ nm}$, dans l'IR. Diode Laser à semi-conducteurs dont la longueur d'onde est variable.

4.b Spectre continu - sources thermiques

• Tout corps macroscopique émet un rayonnement électromagnétique dont le spectre est continu et dont la forme ne dépend que de la température T du corps : on parle de **rayonnement thermique**. Lorsque la température dépasse 10^3 K, ce rayonnement commence à se situer dans le visible : on parle d'incandescence.

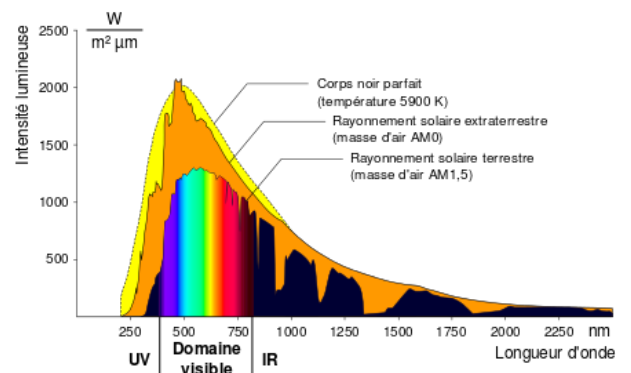
Du fait de l'agitation thermique, les atomes qui composent la source subissent des collisions régulières, les noyaux et électrons sont mis en mouvement rapide, émettant alors de lumière par rayonnement d'une charge accélérée et absorbant celle émise par leurs voisins. Il s'établit un **équilibre entre matière et rayonnement** donc le spectre en intensité, appelé **spectre de rayonnement du corps noir**, possède une forme bien caractéristique visible ci-contre.



L'exemple le plus marquant d'une source de ce type est le **Soleil** (bien qu'il nous apparaisse plutôt jaune) mais les lampes à incandescence (filament chauffé) fonctionnent globalement sur le même principe. En fait, la lumière qui nous arrive du Soleil ne présente pas un spectre aussi lisse puisqu'une partie de la lumière est absorbée par les molécules qui composent l'atmosphère.

Durant le XX^e siècle, la source de lumière la plus économique, et donc la plus répandue, était la **lampe à incandescence**, constituée d'une ampoule de verre emprisonnant un filament de tungstène et un gaz inerte.

La très haute température de fusion du tungstène, 3430 K, permet de faire circuler un courant électrique très intense dégageant une forte puissance thermique sans brûler le fil métallique. Il en résulte un rayonnement thermique à $T \simeq 3.10^3$ K. Malheureusement, le rendement lumineux de ces dispositifs est faible, de l'ordre de 2%, ce qui explique leur abandon progressif.



↳ Exemple ou exercice d'application – Émission de lumière par rayonnement thermique

Un corps porté à la température T émet un rayonnement thermique dont le spectre continu présente son maximum d'intensité lumineuse à la longueur d'onde λ_m qui vérifie $\lambda_m T = A$ (constante) : il s'agit de la loi du déplacement de WIEN. De plus, l'intervalle de longueurs d'ondes dans lequel se situe l'essentiel de l'émission correspond à $\left[\frac{\lambda_m}{2}, 8\lambda_m \right]$.

1. Déterminer la valeur de A sachant que, pour le Soleil, $\lambda_m = 500$ nm pour $T = 5800$ K.
2. En déduire dans quel intervalle spectral se trouve le maximum d'émission d'une lampe à filament de température $T = 2500$ K. Recouvre-t-il le visible ?
3. À quelle température minimale faut-il porter un filament pour qu'il y ait une intersection entre son intervalle spectral d'émission et le domaine visible ? À l'inverse, à partir de quelle température l'émission passe-t-elle complètement dans l'ultra-violet ?

4.c Sources primaires et secondaires

Nous venons de parler d'objets capables d'émettre naturellement de la lumière visible. Or nous sommes en pratique capables de voir bien plus d'objets dont la plupart ne sont pas sources directe de lumière.

Définition – Sources primaires et secondaires

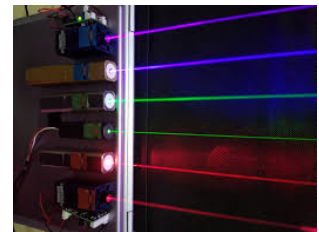
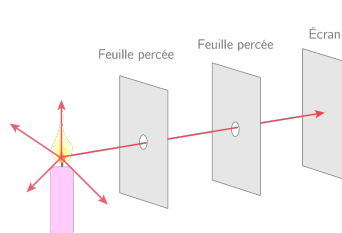
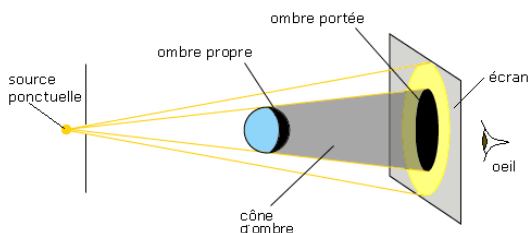
- On distingue les **sources primaires**, capables de produire elles-mêmes la lumière qu'elles émettent des **sources secondaires** qui réfléchissent la lumière qu'elles reçoivent.
- La **réflexion** est dite **diffuse** lorsque la lumière est réfléchi dans un grand nombre de directions et l'énergie du rayon incident est redistribuée dans une multitude de rayons réfléchis. C'est ce phénomène qui permet la vision de la plupart des objets éclairés non transparents et dont la surface est rugueuse au niveau moléculaire.
- La **réflexion** est dite **spéculaire** lorsque le rayon incident donne naissance à un rayon réfléchi unique. Ce type de réflexion ne peut avoir lieu qu'avec certains matériaux qui garantissent que la lumière est réfléchi uniquement par la surface et ne provient pas de l'intérieur de l'objet : les métaux (dont sont constitués les miroirs), les verres, les plastiques transparents et les liquides transparents.

Remarque : de façon plus précise, lorsque de la lumière arrive sur un objet, elle peut soit être **transmise** (le traverser), soit être **réfléchi**, soit être **absorbée**. La réalité est bien une **combinaison** de ces trois phénomènes qui sont fortement **dépendants de la longueur d'onde** : l'eau absorbe les IR et transmet le visible, les plantes absorbent les rayonnements jaunes et rouges et réfléchissent le vert et un peu le bleu.

II Approximation de l'optique géométrique

II.1 Observations expérimentales

Diverses expériences, comme la projection d'un ombre sur un écran, la formation d'un cône de lumière généré par une lampe torche ou encore la visualisation d'un faisceau laser (par diffusion due à de la poussière) mènent à la conclusion que la lumière se propage en ligne droite.



Propriété – Rayon dans un MLTHI

Dans un MLTHI, les rayons lumineux sont des **lignes droites** : $A \longrightarrow B$
Ils peuvent changer de direction lors d'un changement de milieu.

Remarque (HP) : La trajectoire suivie par un rayon lumineux vérifie un "principe de moindre action", appelé en optique principe de FERMAT. Il s'énonce ainsi : "La lumière se propage d'un point à un autre sur des trajectoires telles que la durée du parcours soit localement minimale". Ce principe reste vrai quel que soit le nombre de milieux traversés et est invariant dans le temps.

Propriété – Principe du retour inverse de la lumière

On admettra que si la lumière emprunte un chemin C pour aller de A vers B , alors elle prendrait le même chemin dans l'autre sens pour aller de B vers A . C'est le **principe du retour inverse de la lumière**.

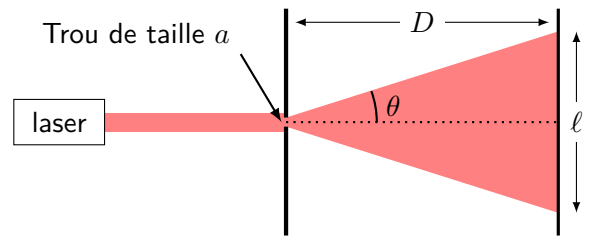
II.2 Limite de la diffraction et approximation de l'optique géométrique

Que se passe-t-il si l'on souhaite **isoler un rayon lumineux**? On pourrait penser diminuer la taille de la fente pour obtenir un rayon de très petit diamètre. Malheureusement, lorsque l'on tente cette expérience on s'aperçoit que la tache projetée à l'écran passe par une taille minimale puis s'élargit lorsque le diamètre du diaphragme devient de l'ordre de quelques fois la longueur d'onde de la lumière (quelques micromètres). C'est le phénomène de la **diffraction**.

Propriété – Ouverture angulaire de la tâche principale de diffraction

- Le phénomène de diffraction est principalement observable dans une zone géométrique caractérisée par un **demi-angle d'ouverture** θ .
- Si on note a la taille caractéristique de l'obstacle et λ la longueur d'onde, on a la relation

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{a}$$



Exemple ou exercice d'application – Diffraction et diamètre d'un cheveu

Avec un laser rouge ($\lambda = 633 \text{ nm}$), on éclaire une fente de largeur a . La taille du faisceau est suffisante pour éclairer la largeur de la fente. On observe l'éclairement sur un écran situé à une distance D de la fente. On note ℓ la largeur de la tâche de diffraction obtenue.

1. Déterminer la relation géométrique entre θ , D et ℓ . En supposant que $\sin \theta \simeq \tan \theta$, appliquer la loi de la diffraction et déterminer l'expression de a en fonction de ℓ , D et λ .

La figure de diffraction d'un cheveu d'épaisseur a est identique à celle produite par une fente de même largeur.

2. Calculer l'épaisseur d'un cheveu produisant une tache de largeur $\ell = 2 \text{ cm}$ à une distance $D = 2 \text{ m}$

Principe ou loi physique – Approximation de l'optique géométrique

L'**approximation de l'optique géométrique** consiste à négliger tout phénomène ondulatoire de diffraction ou d'interférences.

En particulier, la diffraction est négligeable si les dimensions du système sont supérieures à $10^3 \lambda \simeq 0,5 \text{ mm}$.

⚠ Le rayon lumineux est un modèle mathématique utile qu'il est en pratique impossible à observer.

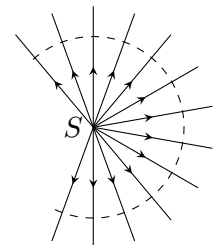
II.3 Modèle de la source ponctuelle

Définition – Source ponctuelle

Une **source lumineuse ponctuelle** est un modèle de source assimilable à un point S .

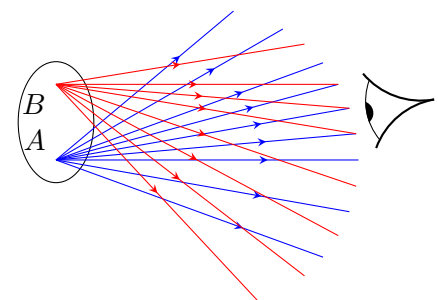
- Une source S émet un nombre infini de rayons dans les directions radiales.
- Dans un MLTHI, les rayons lumineux issus S sont des demi-droites.

Une telle source peut être **monochromatique** (n'émettre qu'une longueur d'onde) ou **polychromatique**.



Une **source étendue** (par exemple une source réelle) est constituée d'un ensemble continu de sources ponctuelles dont les caractéristiques sont à priori indépendantes (chaque point peut, par exemple, émettre à des longueurs d'ondes différentes ou avec des intensités différentes).

Par conséquent, d'une source étendue provient un nombre très infini de rayons, dont l'inclinaison par rapport à un observateur, l'intensité et la longueur d'onde peut varier.



Remarque : Chaque point d'une source étendue placée à distance d'un observateur émet un ensemble de rayons dont seul un nombre restreint va atteindre l'observateur. Les rayons issus de chaque point sont peu inclinés entre-eux mais les faisceaux émis par différents points auront des **inclinaisons différentes** : c'est comme cela que l'observateur arrive à les distinguer.

Propriété – Source à l'infini et faisceau de rayons parallèles

- À la limite d'une source à l'infini, les rayons issus de chaque point forment un **faisceau de rayons parallèles entre eux**.
- L'**inclinaison** de ce faisceau par rapport à l'observateur dépendra ensuite du point source d'origine.



III Interface entre deux milieux – lois de Snell-Descartes

III.1 Énoncé des lois

Définition – Dioptré

Un **dioptré** est une surface, plane ou non, séparant deux milieux LTHI d'indices de réfraction différents.

Exemple : air/eau – air/verre – etc.

Les lois de SNELL-DISCARTES décrivent le comportement de la lumière au niveau d'un dioptré.

Principe ou loi physique – Lois de SNELL-DISCARTES

http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/optiqueGeo/dioptres/Descartes.php

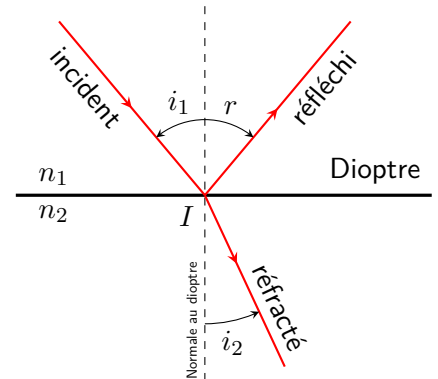
http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/optiqueGeo/dioptres/dioptré_plan.php

- On considère un dioptré séparant un milieu d'indice n_1 d'un milieu d'indice n_2 et un rayon incident. On note I le point d'incidence.
- On introduit la **normale au dioptré** au niveau du point d'incidence I puis on note i_1 l'angle d'incidence par rapport à la normale, r l'angle du rayon réfléchi par rapport à la normale et i_2 l'angle du rayon réfracté.
- À chaque rayon incident correspond un **unique** rayon réfléchi et (généralement) un unique rayon réfracté (transmis).

1^{ère} loi : les trois rayons (incident, réfléchi, réfracté) appartiennent au **plan d'incidence**, formé par le rayon incident et la normale au dioptré en I .

2^{ème} loi : l'angle de **réflexion** est l'opposé de l'angle d'incidence : $r = -i_1$.

3^{ème} loi : l'angle de **réfraction**, lorsque le rayon réfracté existe, est relié à l'angle d'incidence par la loi des sinus : $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$.



Exemple ou exercice d'application – Réfraction simple

Un rayon lumineux arrive depuis l'air sur un dioptré air/eau avec un angle d'incidence $i_1 = 40^\circ$. On donne $n_{\text{air}} = 1$ et $n_{\text{eau}} = 1,33$.

1. Déterminer l'angle de réfraction i_2 .
2. Que vaudrait cet angle si le rayon arrivait depuis l'eau avec la même incidence ?

Remarques :

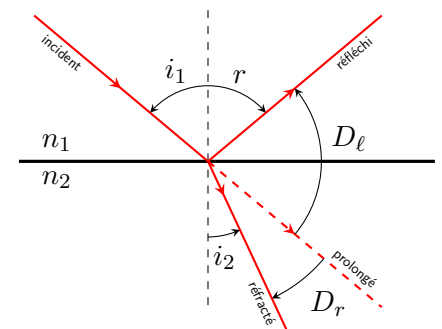
- Si le dioptré n'est pas plan mais courbe (par exemple sur une sphère), il faut considérer le **plan tangent au dioptré** au niveau du point d'incidence ainsi que la normale à ce plan tangent.
- L'énergie lumineuse du rayon incident se partage entre le rayon réfracté et le rayon réfléchi, les proportions dépendant des indices n_1 et n_2 .
- ⚠ Lorsque le rayon incident arrive perpendiculairement au dioptré, on parle d'**incidence normale**. Dans ce cas, $i_1 = 0$ et donc $i_2 = 0$: le rayon réfracté n'est **pas dévié**.

Définition – Déviation

On appelle **déviation** D l'angle duquel est dévié le rayon par rapport à une propagation qui serait restée rectiligne (prolongement du rayon incident).

Propriété – Déviation

Pour la réfraction, $D_r = i_2 - i_1$. Pour la réflexion, $D_\ell = \pi - 2i_1$.



Exemple ou exercice d'application – Indice d'un milieu

Un rayon lumineux dans l'air tombe sur la surface d'un liquide en formant un angle $\alpha = 56^\circ$ avec le plan horizontal. La déviation entre le rayon incident et le rayon réfracté vaut $D_r = 13,5^\circ$.

1. Faire un schéma en précisant les données dessus. En déduire les angles d'incidence i_1 et de réfraction i_2 .
2. Utiliser les lois de DESCARTES pour déterminer l'indice n du liquide.

III.2 Réfraction dans un milieu plus ou moins réfringent – réflexion totale limite

Propriété – Réfraction – réflexion totale limite

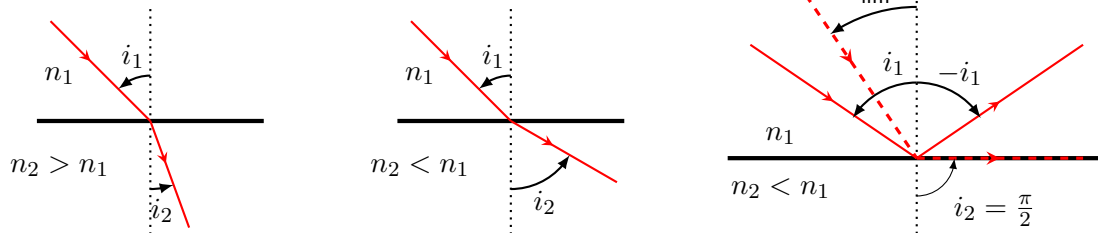
L'angle d'incidence i_1 peut varier de 0 à $\pi/2$ donc $\sin i_1 \in [0, 1]$. On en déduit $\sin i_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin i_1 \in \left[0, \frac{n_1}{n_2}\right]$.

- Si $n_1 < n_2 \Leftrightarrow \frac{n_1}{n_2} < 1$, il existera **toujours un rayon réfracté** qui se **rapproche** de la normale : $i_2 < i_1$.

L'angle maximal de réfraction vaut $\sin i_{2,\max} = \frac{n_1}{n_2}$ pour $i_1 = \frac{\pi}{2}$.

- Si $n_1 > n_2 \Leftrightarrow \frac{n_1}{n_2} > 1$, alors il existe un **angle d'incidence limite** i_{\lim} au-delà duquel le rayon réfracté n'existera pas puisqu'on aurait $\sin i_2 > 1$. Il vérifie $\sin i_{\lim} = \frac{n_2}{n_1}$. Pour $i_1 > i_{\lim}$, il n'existe pas de rayon réfracté, uniquement un rayon réfléchi : ce phénomène s'appelle la **réflexion totale limite**.

Pour $i_1 < i_{\lim}$, le rayon réfracté s'**éloigne** de la normale : $i_2 > i_1$

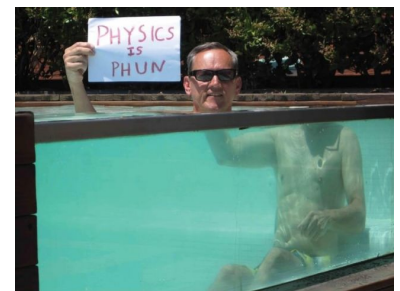


Remarques : la réflexion totale est utile pour guider les ondes lumineuses en empêchant la perte d'énergie par réfraction (fibre optique).

Exemple ou exercice d'application – Aquarium

La paroi d'un aquarium est constituée d'une lame de verre à faces parallèles, d'épaisseur $e = 5$ mm. L'indice optique de l'air est $n_1 = 1,00$; celui du verre est $n_2 = 1,50$ et celui de l'eau $n_3 = 1,33$. Le dioptré air/verre est éclairé avec une incidence $i_1 = 46^\circ$.

1. Faire un schéma puis déterminer les angles de réfraction i_2 dans le verre et i_3 dans l'eau. Que vaut i_3 si l'aquarium ne contient pas d'eau ?



Remarque : le cerveau interprète la position des objets comme si ils se trouvaient dans le **prolongement rectiligne du rayon** arrivant dans l'œil. Cela cause des effets d'optique aux interfaces, notamment avec l'eau.