



O1 · Fondements de l'optique géométrique

La lumière intrigue les scientifiques depuis l'antiquité.

- **Descartes** (1637) et **Snell** (1621) démontrent indépendamment l'importance du milieu de propagation.
- **Rømer** (1676) estime expérimentalement $c = 2,2 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.
- **Newton** (1675), à l'aide d'un prisme, parvient à décomposer la lumière et obtient le **spectre** de la lumière blanche.
- XVIII^e siècle : débat sur la nature de la lumière : Newton → **corpuscule** ; Huygens → **onde**. La théorie de Newton est adoptée.
- **Young** et **Fresnel** (1800) produisent des **interférences lumineuses**, démontrant que la lumière est une **onde**.
- **Maxwell** (1865) montre que la lumière est une **onde électromagnétique** ($\lambda_{\text{visible}} \in [400 \text{ nm}, 750 \text{ nm}]$) se déplaçant à $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ quel que soit le référentiel d'étude (propriété rejetée par la communauté, y compris Maxwell).
- **Einstein** (1905) suppose que c est constant et fonde la relativité restreinte.
- **Einstein** (1905) suppose que la lumière est faite de **corpuscules** pour expliquer l'**effet photoélectrique**, ouvrant la porte à l'émergence de la mécanique quantique.

I - Sources lumineuses

I.1 - Spectre d'une lumière

a) Définition

Définition : Le **spectre** d'un signal est la décomposition de ce signal en l'ensemble des fréquences qui le compose.

Propriété : Chaque fréquence est interprétée par le cerveau humain comme une couleur différente.

Définition : La **fréquence** d'une onde électromagnétique et sa **longueur d'onde dans le vide** sont reliées par :

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu}$$

Avec : $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ la vitesse de la lumière dans le vide.

Il y a donc équivalence entre :

- la fréquence ν de l'onde lumineuse ;
- sa longueur d'onde dans le vide λ_0 ;
- la couleur perçue par un humain.

Par habitude, on représente le spectre d'une source lumineuse en fonction de λ_0 , et non en fonction de ν . Il existe deux types de spectre : les **spectres continus** et les **spectres discrets**.

b) Spectre continu

Propriétés :

Tout corps chauffé à une température T émet une onde électromagnétique.

La courbe $I(\lambda_0)$ (intensité en fonction de la longueur d'onde) est une courbe en cloche. Notons $(\lambda_{\text{max}}, I_{\text{max}})$ les coordonnées du maximum. Plus T augmente, plus I_{max} augmente et plus λ_{max} diminue.

Conséquences :

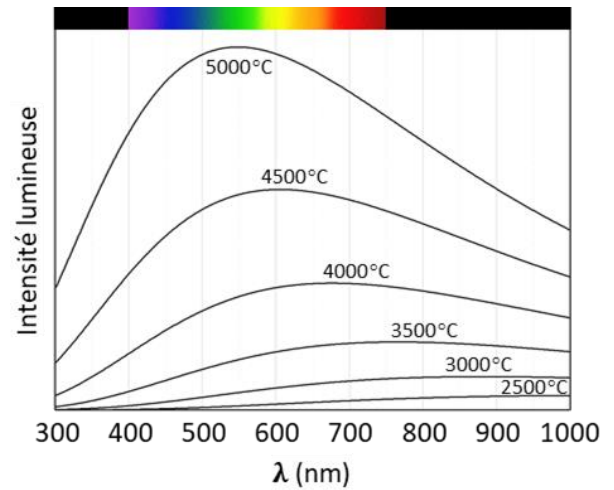
- Plus un corps est chaud, plus il émet de lumière et plus le spectre de cette lumière se décale vers le bleu.
- Il ne peut pas exister d'étoile verte, car un corps où $\lambda_{\text{max}} = 500 \text{ nm}$ (vert) émet également beaucoup de bleu et de rouge, et apparaît donc blanc.

Exemples :

- Si $T \approx 10\,000\text{ K}$, le corps apparaît bleu.
- Si $T \approx 500 - 1000\text{ K}$, le corps apparaît rouge.
- Si $T \approx 37^\circ\text{C}$, $\lambda_{\text{max}} \approx 9,3\text{ }\mu\text{m}$. Un être humain émet dans l'infrarouge ($\rightarrow$ caméra thermique).
- À $T \approx 5\,800\text{ K}$ (cas du soleil), $\lambda_{\text{max}} \approx 500\text{ nm}$. Le soleil émet dans le visible et est vu blanc (depuis l'espace).

Propriété :

Un rayonnement d'origine thermique est toujours **polychromatique**.



c) Spectre discret

Dans une **lampe spectrale**, on fournit de l'énergie électrique à un gaz, qu'il restitue sous forme d'énergie lumineuse. Le spectre d'une telle lumière est **discret** : il possède des **raies spectrales**, du fait de la quantification des niveaux d'énergie électroniques des éléments du gaz.

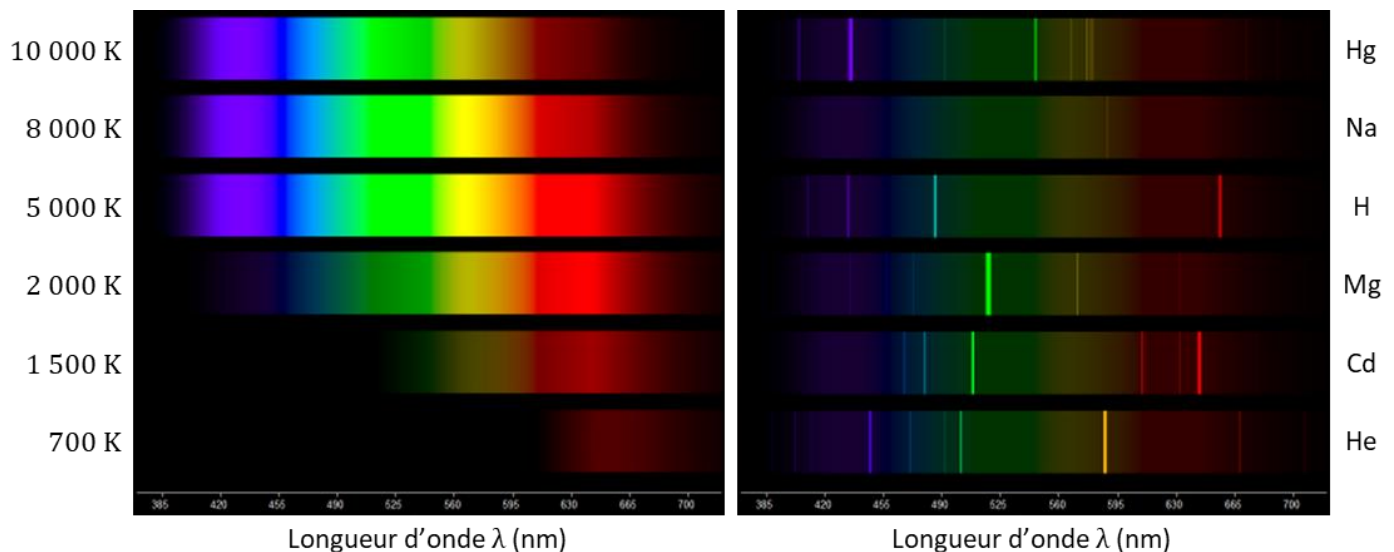
Propriété :

Le spectre d'un élément est **polychromatique** et la position des raies est **caractéristique de l'élément**.

Remarque :

Dans un laser, on filtre de manière très sélective une longueur d'onde d'un spectre de raie. On obtient alors un rayonnement **monochromatique**.

Figure : Spectre continu vs. spectres discrets



I.2 - Modèle de la source ponctuelle monochromatique

Dans tout le cours d'optique, sauf indication du contraire, on suppose que les sources utilisées sont ponctuelles et monochromatiques.

- **Ponctuelle** : la source n'a pas d'extension spatiale ;
- **Monochromatique** : le spectre ne contient qu'une seule longueur d'onde.

Il s'agit d'un modèle théorique : aucune source n'est ponctuelle ou parfaitement monochromatique (les raies spectrales ont toujours une largeur non nulle).

En pratique, un { laser } ou une { source + filtre chromatique + diaphragme } sont des bonnes approximations de la source ponctuelle monochromatique.

II - Milieu de propagation

II.1 - Cas du vide

La lumière est une onde électromagnétique qui se propage dans le vide à la vitesse de $c \simeq 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Fréquence et longueur d'onde dans le vide sont reliées par : $\lambda_0 = \frac{c}{\nu}$.

Couleur approximativement perçue (en nm) :

$$\lambda_0^{\text{violet}} = 400 \quad \lambda_0^{\text{bleu}} = 450 \quad \lambda_0^{\text{vert}} = 500 \quad \lambda_0^{\text{jaune}} = 570 \quad \lambda_0^{\text{orange}} = 600 \quad \lambda_0^{\text{rouge}} = 700$$

II.2 - Cas des milieux LTHI

Dans ce cours, nous étudierons exclusivement des milieux linéaires, transparents, homogènes et isotropes (MLTHI)/

- **Linéaire** : la fréquence de l'onde n'est pas modifiée au cours de la propagation.
- **Transparent** : la lumière n'est pas absorbée.
- **Homogène** : les propriétés physiques (température, densité...) du milieu sont les mêmes en tout point du milieu.
- **Isotrope** : les propriétés physiques (indice optique...) du milieu sont les mêmes dans toutes les directions du milieu.

Définitions :

Un MLTHI est caractérisé par son **indice optique** ou **indice de réfraction**, noté n . C'est un nombre sans dimension supérieur à 1, défini comme le rapport de la lumière dans le vide et de la lumière dans le milieu.

$$n = \frac{c}{v} \geq 1$$

Plus son indice optique est élevé, plus le milieu est dit **réfringent**.

Ordres de grandeur :

- $n_{\text{vide}} = 1,00$ ← moins réfringent
- $n_{\text{air}} \simeq 1,00$
- $n_{\text{eau}} = 1,33$
- $n_{\text{verre}} \simeq 1,5$
- $n_{\text{diamant}} \simeq 2,4$ ← plus réfringent

Propriété :

Rappel :

La couleur d'une lumière est donnée par sa fréquence (ou sa longueur d'onde dans le vide) et non par sa longueur d'onde. Conséquence : un laser rouge ne change pas de couleur lorsqu'il passe de l'air à l'eau.

Définition :

Remarque :

C'est à l'aide de milieux dispersifs que l'on peut obtenir le spectre d'une lumière. Exemple : le verre (prisme).

III - Approximation de l'optique géométrique

III.1 - Description du modèle

En **optique géométrique**, la propagation de l'énergie lumineuse est modélisée par un **rayon lumineux**. Il s'agit d'un faisceau de lumière parallèle infiniment fin.

Remarques :

- Il est en réalité impossible d'obtenir un rayon lumineux car lorsque la lumière passe par une fente de taille comparable ou inférieure à la longueur d'onde, elle diffracte (cf. III.2)
- En optique géométrique, les aspects ondulatoires de la lumière peuvent être négligés.



Propriétés :

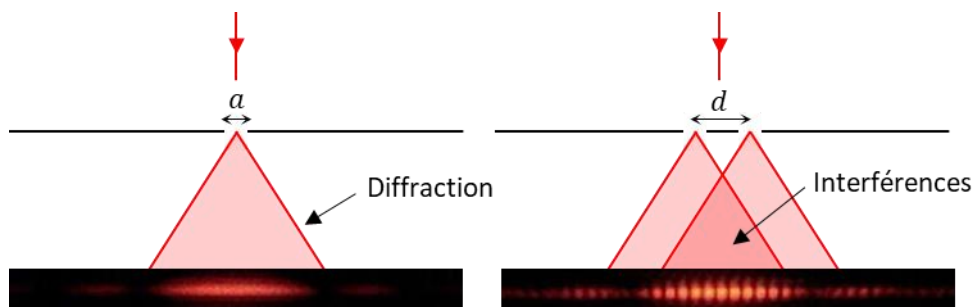
Un rayon lumineux se représente par un **trait orienté** dans le sens de propagation de la lumière. Il vérifie, dans un MTHI, les propriétés suivantes.

- **Propagation rectiligne** • Dans un MLTHI, les rayons lumineux se propagent en ligne droite.
- **Indépendance des rayons lumineux** • Deux rayons lumineux n'interagissent pas entre eux et se propagent de manière indépendante.
- **Principe du retour inverse de la lumière** • Le trajet de la lumière est indépendant du sens de parcours : si un certain chemin reliant un point A à un point B peut être parcouru par un rayon lumineux, alors un rayon lumineux pourra suivre le même chemin pour aller de B à A.

III.2 - Limites du modèle

Limitations du modèle de l'optique géométrique :

- Phénomène de **diffraction** (interaction de la lumière avec des objets de taille $a \lesssim 1000 \lambda_0$) $\Rightarrow$ propagation non rectiligne, pas de retour inverse.
- Phénomène d'**interférence** (superposition de deux sources cohérentes) $\Rightarrow$ non indépendance des rayons lumineux, pas de retour inverse.



- Isolateurs optique (qui exploite la **polarisation** de la lumière, exemple : vitre sans tain) $\Rightarrow$ pas de retour inverse.

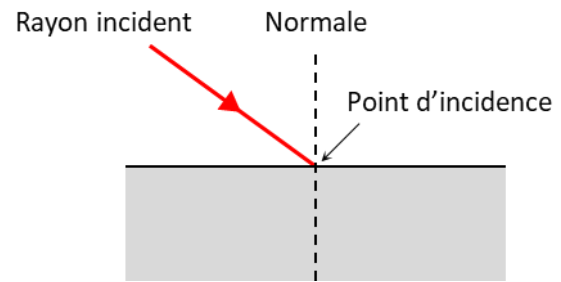
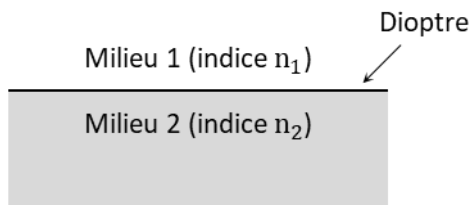
IV - Lois de Snell-Descartes

IV.1 - Vocabulaire

On appelle :

- **Dioptre** : l'interface séparant deux milieux
- **Rayon incident** : le rayon arrivant sur un dioptre
- **Point d'incidence** : le point d'intersection entre le rayon incident et le dioptre

- **Normale** : la droite perpendiculaire au dioptre passant par le point d'incidence ;
- **Plan d'incidence**, le plan contenant le rayon incident et la normale (c'est le plan de la feuille).



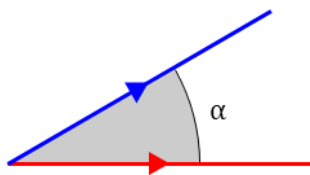
IV.2 - Énoncé des lois

IV.3 - Angles orientés

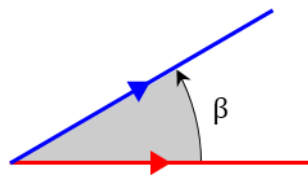
On a défini les lois de Snell-Descartes avec des angles non-orienté (toujours positifs).

Définition :

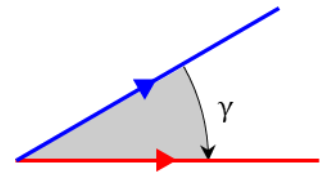
Un **angle orienté** est un angle dont le dont le signe dépend d'une convention d'orientation. Par convention, il est positif s'il est orienté dans le sens trigonométrique.



Non orienté



Orienté et > 0



Orienté et < 0

Dans cet exemple : $\alpha = \beta = -\gamma > 0$

Application n°1 :

Écrire les lois de Snell-Descartes avec des angles orientés.

Définition :

On appelle **déviation** l'angle (souvent pris orienté) entre le rayon incident et un rayon émergent.

Application n°2 :

Déterminer la déviation pour un rayon transmis à travers un dioptre plan, et pour un rayon réfléchi par un dioptre plan. Préciser leur signe.

IV.4 - Condition de réflexion totale



Remarque :

Le phénomène de réflexion totale est utilisé dans les **fibres optiques** pour guider le rayon lumineux.

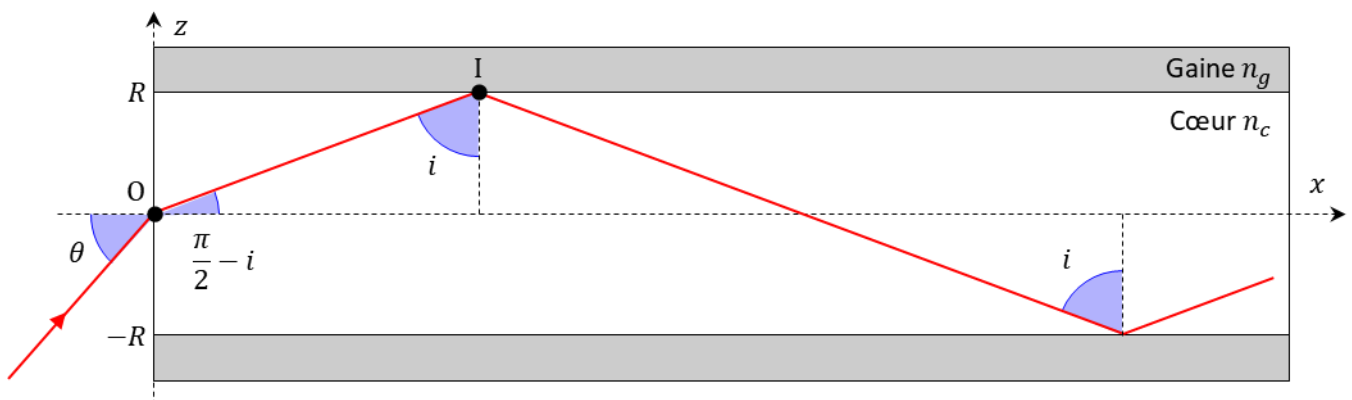
V - Application : la fibre optique à saut d'indice

V.1 - Modélisation

Une fibre optique à **saut d'indice** est constituée de :

- Un cœur d'indice n_c ;
- Une gaine d'indice $n_g < n_c$.

Objectif : Maintenir le rayon lumineux dans le cœur grâce à des réflexions totales aux interfaces cœur / gaine.



V.2 - Cône d'acceptance

Propriété :

Un rayon lumineux sera guidé par la fibre optique si et seulement s'il est compris dans le **cône d'acceptance**, d'angle au sommet :

$$\theta_{lim} = \arcsin \left(\sqrt{n_c^2 - n_g^2} \right)$$

V.3 - Dispersion

