

# OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE

## chapitre 1

### Propagation de la lumière

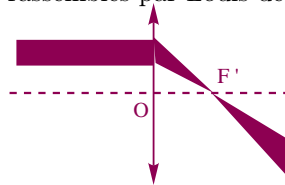
La nature physique de la lumière a été la source de controverses. Newton a été le premier à proposer une théorie de la lumière, dans son ouvrage *Optics*, publié en 1701. Pour lui, la lumière serait composée de particules de différentes couleurs ; le phénomène de réflexion de la lumière s'interpréterait comme un simple rebond de ces particules sur une surface réfléchissante.

La découverte des phénomènes de diffraction et d'interférences aux 18<sup>e</sup> et 19<sup>e</sup> siècles a conduit à rejeter cette interprétation corpusculaire de la lumière. Huygens et Frenel ont au contraire jeté les bases d'une théorie ondulatoire de la lumière, qui a été intégrée vers 1875 par James Clerk Maxwell dans une théorie plus vaste : l'électromagnétisme. Il semblait alors que la nature physique de la lumière était finalement établie.

Au début du 20<sup>e</sup> siècle, les travaux d'Einstein sur l'effet photoélectrique l'ont amené à reconsidérer cette position, et à revenir à une interprétation corpusculaire. Les deux points de vue, ondulatoire et corpusculaire, apparemment incompatibles, ont été finalement rassemblés par Louis de Broglie vers 1925.

Plan du chapitre.

1. La lumière
  - 1.1 Nature ondulatoire de la lumière
  - 1.2 Nature corpusculaire de la lumière
  - 1.3 La dualité de la lumière
  - 1.4 Vitesse de la lumière dans un milieu matériel
  - 1.5 Rayon lumineux
2. Propagation de la lumière ; lois de Descartes
  - 2.1 Propagation dans un milieu homogène
  - 2.2 Réflexion de la lumière
  - 2.3 Réfraction de la lumière
3. Généralisation : réflexion et réfraction des ondes



certain droits réservés  
ne peut pas être vendu

# 1 La lumière.

## 1.1 Nature ondulatoire de la lumière.

La lumière peut être modélisée par une onde électromagnétique. Elle est alors associée à un champ électrique  $\vec{E}$  et un champ magnétique  $\vec{B}$  qui se propagent en vibrant selon une direction repérée par un vecteur noté conventionnellement  $\vec{k}$ . Les vecteurs  $\vec{k}$ ,  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  sont orthogonaux deux à deux, et forment un trièdre direct.

Comme tout phénomène ondulatoire, la lumière est caractérisée par une longueur d'onde  $\lambda$  (en mètres, m), ou par sa fréquence  $\nu$  (en hertz, Hz, homogène à l'inverse d'un temps :  $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$ ), ou encore sa période  $T$  (en seconde, s). Ces trois grandeurs sont reliées par l'intermédiaire de la vitesse de la lumière  $c$  :

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

On définit aussi le nombre d'onde  $\sigma$ , égal à l'inverse de la longueur d'onde (donc en  $\text{m}^{-1}$ ) :

$$\sigma = \frac{1}{\lambda} \quad (2)$$

La lumière visible est un cas particulier d'onde électromagnétique, correspondant aux longueurs d'onde comprises entre 0,4 et 0,8  $\mu\text{m}$  environ. Ce cas n'est pas particulier d'un point de vue physique, mais uniquement en ce sens que nos yeux sont sensibles à cette gamme de longueurs d'onde, présente en quantité importante dans le spectre solaire.

## 1.2 Nature corpusculaire de la lumière.

On peut considérer la lumière comme un flux de particules, appelées **photons** ; c'est l'hypothèse d'Einstein. Un photon est une particule de masse strictement nulle, se déplaçant à la vitesse de la lumière, et transportant une énergie cinétique  $E$ . On qualifie donc parfois ces particules immatérielles de *grains d'énergie*. Une lumière de longueur d'onde  $\lambda$  et de fréquence  $\nu$  est un flux de photons, dont chacun transporte une énergie :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (3)$$

où  $h$  est une constante universelle, appelée *constante de Planck*, et qui vaut :  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ .

L'intensité lumineuse  $I$ , correspondant à l'énergie totale transportée par la lumière par unité de temps est relié au nombre  $N$  de photons arrivant par unité de temps :

$$I = Nh\nu \quad (4)$$

L'énergie d'un photon étant très petite, le joule n'est pas une unité adaptée. Il est commode de définir une nouvelle unité d'énergie, l'*électron-volt*, dont l'ordre de grandeur est de celui de l'énergie d'une particule élémentaire. La correspondance entre l'électron-volt et le joule est :  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .

## 1.3 La dualité de la lumière.

Les deux aspects corpusculaire et ondulatoire de la lumière sont complémentaires, et apparemment irréconciliables. Cette dualité onde/corpuscule est générale à toute la physique des particules. Chacun des deux aspects est commode pour interpréter certains phénomènes. Ainsi, l'aspect ondulatoire de la lumière permet d'étudier les phénomènes optiques, que ce soit d'optique géométrique (réflexion, réfraction) ou d'optique physique (diffraction et interférences, qui seront vues en deuxième année). L'aspect corpusculaire est intéressant pour l'étude des interactions entre la lumière et la matière.

## 1.4 Vitesse de la lumière dans un milieu matériel.

La vitesse de la lumière dans le vide est :  $c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Dans un milieu matériel, la lumière se propage moins rapidement. Sa vitesse  $v$  dépend de la nature du milieu :

$$v = \frac{c}{n} \quad (5)$$

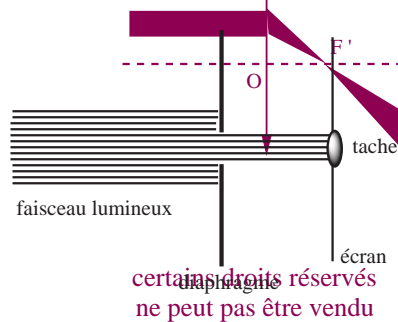
où  $n$  est l'**indice optique** du milieu. Comme  $v < c$ , on a, pour tout milieu  $n > 1$ . Dans l'air, la lumière se propage quasiment aussi rapidement que dans le vide, soit  $n_{\text{air}} \approx 1$ . Dans l'eau, la lumière se propage nettement moins rapidement :  $n_{\text{eau}} = 1,33$ . Dans le verre, la vitesse est encore moins grande :  $n_{\text{verre}} = 1,5$  à  $1,9$ , selon la nature du verre.

Cette relation n'est valable que dans le domaine visible. Par ailleurs, les valeurs numériques des indices ci-dessus correspondent à des valeurs moyennes dans le domaine visible. En réalité, l'indice d'un milieu dépend de la longueur d'onde de la lumière, selon la relation empirique de Cauchy :

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} \quad (6)$$

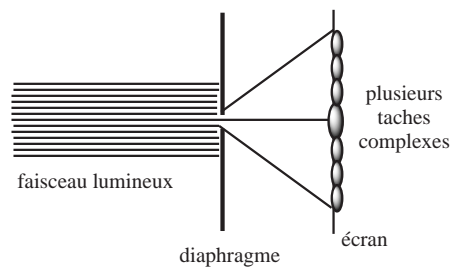
## 1.5 Rayon lumineux.

Considérons une source, qui envoie un faisceau lumineux. On désire isoler la plus petite partie du faisceau, pour le rendre infiniment mince, par exemple pour isoler la trajectoire d'un photon particulier du faisceau. On peut pour cela utiliser un *diaphragme*, c'est-à-dire faire passer le faisceau dans un trou de dimension très petite. À la sortie du diaphragme, on place un écran, sur lequel le faisceau forme une tache.



L'œil est muni d'un diaphragme dont l'ouverture varie en fonction de la luminosité.

Si on diminue progressivement l'ouverture du diaphragme, on constate qu'en-deçà d'une certaine ouverture, le faisceau s'élargit et une figure complexe apparaît sur l'écran ; c'est le phénomène de *diffraction*. Il a lieu dès que le diamètre du diaphragme est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la lumière, ou inférieur. Il est donc impossible d'isoler un rayon lumineux ; on ne peut avoir qu'une brassée de rayons, ou un *pinceau lumineux*.



Ce qu'on vient de dire ne doit pas faire croire qu'il est impossible d'étudier un photon unique. En effet, il existe des dispositifs permettant d'émettre *un seul* photon. En revanche, il est impossible d'isoler la trajectoire d'un unique photon à partir d'un faisceau lumineux.

## 2 Propagation de la lumière. Lois de Descartes.

### 2.1 Propagation dans un milieu homogène.

Dans un milieu homogène, c'est-à-dire dont les propriétés sont les mêmes en tout point, la lumière se *propage en ligne droite*. Ceci est une conséquence du *principe de Fermat* (hors programme), dont un énoncé simplifié stipule que la lumière suit le chemin tel que son temps de propagation soit le plus court. Le principe de Fermat est équivalent à un autre principe dont l'emploi est souvent fructueux.

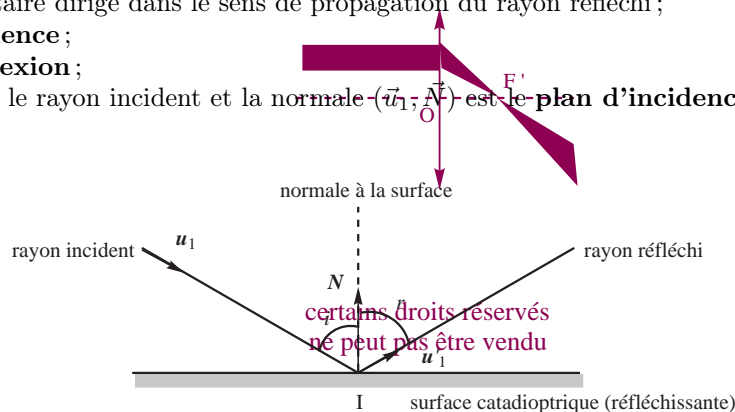
#### Principe du retour inverse de la lumière.

Le chemin parcouru par la lumière entre une source et un récepteur est le même, mais parcouru en sens inverse, si on échange les positions de la source et du récepteur.

### 2.2 Réflexion de la lumière.

Considérons une **surface catadioptrique**, c'est-à-dire une surface réfléchissant la lumière. Un **rayon incident** parvient à la surface en I, et est réfléchi sous forme d'un **rayon réfléchi**. On appelle :

- $\vec{N}$  le vecteur unitaire normal à la surface au point I, c'est-à-dire perpendiculaire à la surface (ou à son plan tangent, si elle n'est pas plane), orienté par convention du côté du rayon réfléchi;
- $\vec{u}_1$  le vecteur unitaire dirigé dans le sens de propagation du rayon incident;
- $\vec{u}'_1$  le vecteur unitaire dirigé dans le sens de propagation du rayon réfléchi;
- $i$  l'**angle d'incidence**;
- $r$  l'**angle de réflexion**;
- le plan contenant le rayon incident et la normale  $(\vec{u}_1, \vec{N})$  est le **plan d'incidence** de la lumière.



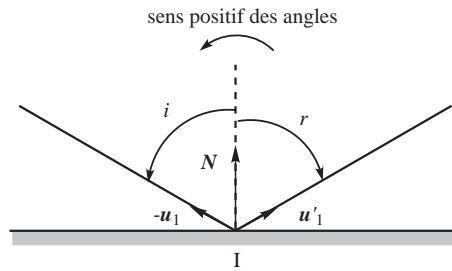
Dans la première moitié du 17<sup>e</sup> siècle, et indépendamment l'un de l'autre, Snell et Descartes ont étudié la réflexion de la lumière et ont établi les propriétés géométriques du rayon réfléchi par rapport au rayon incident.

#### Loi de Snell-Descartes pour la réflexion.

- Le rayon réfléchi appartient au plan d'incidence :  $\vec{u}'_1 \in (\vec{u}_1, \vec{N})$
- Les rayons incident et réfléchi sont de part et d'autre de la normale  $(I, \vec{N})$
- Les angles d'incidence et de réflexion sont égaux :  $r = i$ , avec :  $r, i \in [0, \pi/2]$

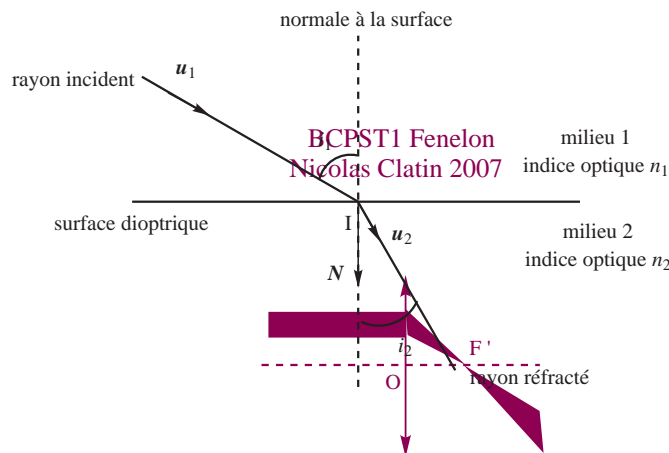
Cette loi peut être formulée algébriquement, à condition d'orienter les angles. On commence donc par choisir un sens positif des angles, par exemple le sens trigonométrique. Les angles des rayons incident et réfléchi  $i$  et  $r$  sont alors définis algébriquement à partir de la normale, comme sur la figure ci-dessous. La loi de Snell-Descartes pour la réflexion s'écrit alors :

$$(\vec{N}, -\vec{u}_1) = -(\vec{N}, \vec{u}'_1) \quad \text{soit :} \quad \boxed{r = -i} \quad (7)$$



## 2.3 Réfraction de la lumière.

On considère maintenant un rayon lumineux passant d'un milieu d'indice optique  $n_1$  à un milieu d'indice optique  $n_2$ . La séparation entre les deux milieux est une **surface dioptrique**, c'est-à-dire une surface permettant le passage de la lumière.



Un rayon incident parvient à la surface dioptrique au point I. Le rayon qui se propage après l'interface est le **rayon réfracté**. On appelle :

- $\vec{N}$  le vecteur unitaire normal à la surface, c'est-à-dire perpendiculaire à la surface, et orienté par convention du côté du rayon réfracté.
- $\vec{u}_1$  le vecteur unitaire dirigé dans le sens de propagation du rayon incident.
- $\vec{u}_2$  le vecteur unitaire dirigé dans le sens de propagation du rayon réfracté.
- $i_1$  l'**angle d'incidence**.
- $i_2$  l'**angle de réfraction**.
- le plan contenant le rayon incident et la normale  $(\vec{u}_1, \vec{N})$  est le **plan d'incidence** de la lumière.

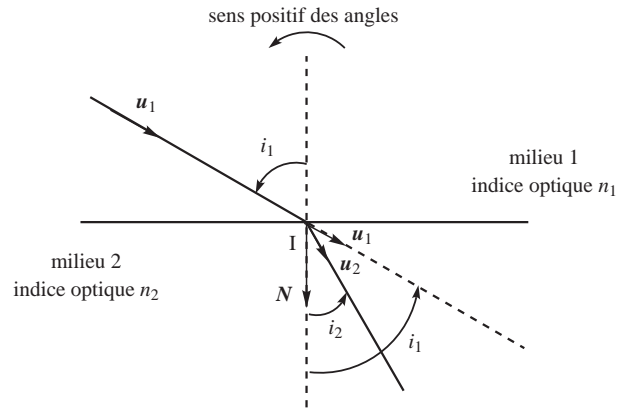
Attention! L'orientation du vecteur normal n'est pas le même dans le cas de la réflexion et de la réfraction! On pourrait la prendre identique, mais cela compliquerait les formules. Il faut retenir que le vecteur normal est orienté du côté du rayon qui *repart* de la surface après passage au point I.

C'est encore Snell et Descartes qui ont étudié les propriétés du rayon réfracté.

### Loi de Snell-Descartes pour la réfraction.

- Le rayon réfracté appartient au plan d'incidence :  $\vec{u}_2 \in (\vec{u}_1, \vec{N})$
- Les rayons incident et réfracté sont de part et d'autre de la normale  $(I, \vec{N})$
- Les angles d'incidence et de réfraction vérifient la relation :  
 $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$ , avec :  $i_1, i_2 \in [0, \pi/2]$

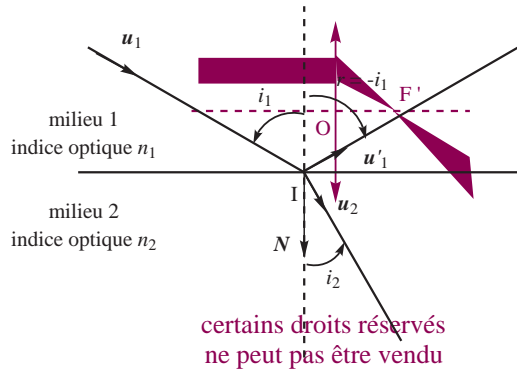
Cette loi peut également être formulée algébriquement, les angles des rayons incident et réfracté  $i_1$  et  $i_2$  étant définis algébriquement à partir de la normale.



On a alors :

$$n_1 \sin(\vec{N}, \vec{u}_1) = n_2 \sin(\vec{N}, \vec{u}_2) \quad \text{soit :} \quad \boxed{n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2} \quad (8)$$

Sur une surface dioptrique, les choses sont généralement plus complexe. En effet, il y a toujours une partie de la lumière qui est réfléchi. Les proportions de lumière réfléchi et réfractée dépendent des indices optiques  $n_1$  et  $n_2$ .



En revanche, sur une surface catadioptrique, le rayon réfracté peut être quasiment inexistant ; on observe alors uniquement un phénomène de réflexion.

### 3 Généralisation : réflexion et réfraction des ondes.

Les lois précédentes se généralisent, avec des adaptations, aux autres phénomènes ondulatoires :

- ondes sonores,
- ondes mécaniques (vagues, corde vibrante, ressort...),
- ondes sismiques.

Pour ce qui concerne les ondes sismiques, on observe des phénomènes de réflexion et de réfraction au niveau des interfaces entre les couches constituant la Terre. L'étude de ces réflexions et réfractions est d'ailleurs l'unique moyen de vérification expérimentale des modèles de l'intérieur du Globe. Le problème est assez complexe, car il en existe de deux sortes :

- les ondes sismiques P sont des ondes longitudinales (la vibration est dans la direction de la propagation, comme dans le cas des ondes sonores), ce qui correspond à une compression du milieu de propagation,
- les ondes sismique S sont des ondes transversales (la vibration est perpendiculairement à la direction de propagation, comme dans les ondes lumineuses ou les vagues), ce qui correspond à un cisaillement du milieu de propagation.

La vitesse de propagation des ondes sismiques varie suivant la nature du milieu dans lequel elles se propagent. Les discontinuités de la vitesse de propagation sont donc caractéristiques du passage d'une couche du globe terrestre à une autre couche. C'est ainsi qu'on peut affirmer que la Terre est constituée de quatre parties principales : la graine, le noyau externe, le manteau inférieur et le manteau supérieur (ce dernier étant surmonté de la croûte, d'épaisseur négligeable). Les ondes sismiques S et P ne se comportent pas de la même façon lors de leur réfraction ou de leur réflexion, ce qui donne des indications sur la nature physico-chimique des milieux traversés. En particulier, les ondes sismiques S ne se propagent pas dans les milieux liquides (qui ne peuvent pas être soumis à des contraintes de cisaillement) ; ainsi la vitesse de propagation nulle des ondes sismiques S dans le noyau externe permet d'affirmer que celui-ci est liquide.

Les compositions minéralogiques des différentes couches sont postulées à partir de modèles théoriques et d'expériences de laboratoire. On connaît la nature de chacune des couches, mais seulement dans les grandes lignes ; de nombreuses incertitudes demeurent sur les détails.

Référence : DEWAELE Agnès et SANLOUP Chrystèle, *L'intérieur de la Terre et des planètes*, Belin, 2005.

certains droits réservés  
ne peut pas être vendu