CH II. Propagation de la lumière

Introduction

La lumière est la propagation de de l'énergie mais sous quelle forme ? Des corpuscules (Newton 1675, Planck 1900 : quanta d'énergie, Einstein 1905 : photons) ou ondes (Huygens 1690, Young 1807, Fresnel 1820, Maxwell 1865 : ondes électromagnétiques) ? Les deux (De Broglie 1924 : dualité onde-corpuscule, chaque grain d'énergie est lié à un système d'ondes).

I. Ondes électromagnétiques

La lumière se propage comme une onde. Ceci explique les interférences et la diffraction.

1. Ondes : On appelle onde scalaire toute déformation ou vibration dont l'amplitude A(x,y,z,t) ou encore A(r,t) est une fonction périodique des variables temporelle (t) et spatiale (r).

Une telle vibration est caractérisée par :

• Son amplitude ;

• Sa fréquence f ou Période : T=1/f; où f est le nombre de cycles par seconde, et T la durée d'un cycle. f s'exprime en Hertz (Hz ou s^{1}).

• Sa longueur d'onde λ

C'est la distance parcourue par l'onde pendant la durée d'un cycle de vibration.

λ (en m) = v × T

2. Ondes électromagnétiques

On dit aussi rayonnements (ou radiations) électromagnétiques.

la lumière se propage dans le vide sans support matériel. Entre le Soleil et la Terre, il y a un vide poussé. On voit le Soleil mais on entend pas les explosions qui s'y produisent. La lumière n'est pas une onde élastique, c'est une onde électromagnétique.

Une onde électromagnétique correspond à la propagation d'un champ électromagnétique qui est la superposition d'un champ électrique E et d'un champ magnétique B dépendant du temps et de la position.

Champ électrique : $\vec{E}(\vec{r},t)$, Champ magnétique : $\vec{B}(\vec{r},t)$

L'œil peut détecter les ondes électromagnétiques dont les longueurs d'onde dans le vide sont comprises entre 380 nm et 780 nm. A chaque longueur d'onde correspond une « couleur spectrale » avec les groupes suivants :

• Violets : de 400 à 430 nm (violet moyen : 420 nm)

• Bleus : de 460 à 490 nm (bleu moyen : 470 nm)

• Verts : de 500 à 560 nm (vert moyen : 530 nm)

• Jaunes : de 560 à 585 nm (jaune moyen : 580 nm)

• Orangés : de 585 à 620 nm (orangé moyen : 600 nm)
• Rouges : de 620 à 700 nm (rouge moyen : 650 nm)

Remarque 1 : le spectre des rayonnements électromagnétiques s'étend des ondes hertziennes jusqu'aux rayons γ et au-delà. On distingue les différents types de rayonnements en fonction de leur longueur d'onde et de leur origine physique :

• Ondes hertziennes : 1 mm – 1 km (circuits électriques oscillants)
• IR : 780 nm – 1 mm (rotations ou vibrations des molécules)
• Visible : 380 nm – 780 nm
• UV : 10 nm – 380 nm
• Rayons X : 0,1 Å – 30 nm
• Rayons γ : 10^{-13} m − 1 Å (désexcitation des noyaux atomiques)

Remarque 2 : comme tous les autres rayonnements électromagnétiques, la lumière se propage dans le vide à la vitesse :

$c = 299\,792\,458 \text{ km. s}^{-1} \approx 2{,}9979 .10^{8} \text{ m. s}^{-1} \approx 3{,}00 .10^{8} \text{ m. s}^{-1}$

II. Photons

La lumière est de l'énergie qui se propage. La théorie quantique dit que la lumière se présente sous la forme de « paquets » d'énergie (« quanta d'énergie », « photon ») contenant chacun d'autant plus d'énergie que la fréquence de l'onde lumineuse est grande, et donc que la longueur d'onde est petite. Dans une lumière monochromatique de fréquence f et donc de longueur d'onde dans le vide $\lambda = c/f$, l'énergie E de chaque photon est donnée par la relation de PLANCK :

$E = h.f$ où $h = 6{,}6261.10^{-34}$ J. s est la constante de Planck.

$E = hc/\lambda$ où c est la vitesse de la lumière dans le vide.

Remarque 1 : la relation de Planck est valable pour tout rayonnement électromagnétique. L'énergie apportée par un photon X ou un photon γ est assez grande pour arracher un électron à la matière : les rayons X ou γ sont des rayonnements ionisants (pas les micro-ondes qui ne font que chauffer sans dénaturer...).

III. Propagation de la lumière

1. introduction :

Pour représenter la propagation d'une onde lumineuse, on remplace l'onde par des rayons rectilignes qui changent de direction lorsqu'ils rencontrent des obstacles (en étant réfléchis par la surface de l'obstacle et réfractés dans le cas d'obstacles transparents) ou qui continuent tout droit en l'absence d'obstacles. Cette description simple qui est celle de l'optique géométrique n'est valable que si la taille des obstacles et aussi des trous entre les obstacles est grande par rapport aux longueurs d'onde qui composent la lumière.

2. Propagations rectilignes

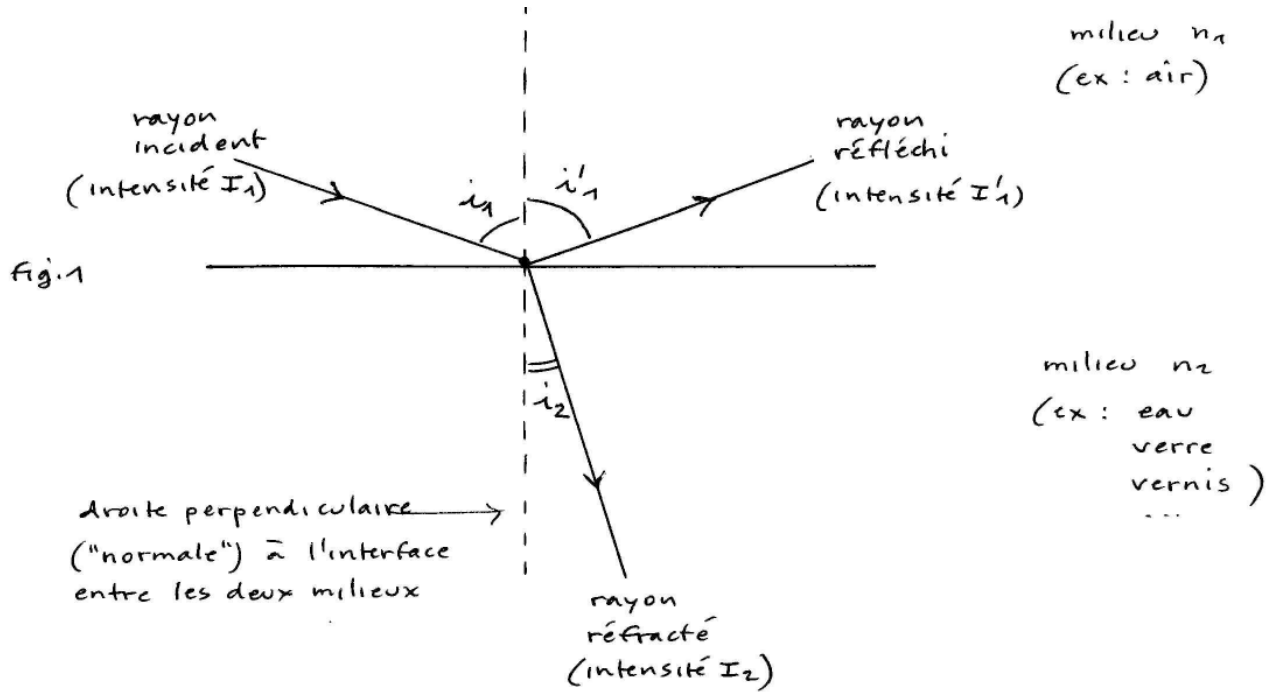
Dans le vide, la lumière se propage en ligne droite. C'est aussi le cas dans les milieux matériels où la vitesse de la lumière est la même en tous points ainsi que dans toutes les directions (milieux « optiquement homogènes et isotropes »).

De tels milieux sont caractérisés par un nombre sans dimension, leur indice de réfraction : $n = c/v$ ($n \geq 1$) et ont la propriétés d'être transparents (c-à-d on voit nettement les objets placés derrière) ce qui implique qu'ils se laissent traverser par les champs électriques (milieux dits « diélectrique ») contrairement aux métaux.

Lorsque la lumière arrive d'un milieu d'indice n_1 à un milieu d'indice n_2, une partie repart dans le milieu 1, le reste passe dans le milieu 2, en obéissant aux lois de la réflexion et de la réfraction.

. Réflexion régulière

Cette réflexion est aussi dite « spéculaire », du latin « speculum » qui signifie « miroir ».



a. Aspect géométrique : lois de la réflexion

Le plan contenant le rayon incident et le rayon réfléchi est perpendiculaire à la surface de séparation entre les deux milieux.

L'angle d'incidence et l'angle de réflexion sont égaux : $i_1 = i'_1$

b. Facteur de réflexion régulière

On définit $R = I'_1/I_1$ comme étant le pourcentage de lumière réfléchie. R dépend de n_1, n_2 et de i_1 (lois de Fresnel).

Dans le cas particulier où $i_1 = 0$ (« incidence normale »), on a : $R = (\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2})^2$

Dans tout ce qui précède, on suppose que la surface est lisse.

Si la surface est irrégulière, une partie plus ou moins grande (suivant l'état de surface) de la lumière réfléchie dans le milieu n_1 est diffusée dans d'autres directions que . On a une réflexion diffuse.

. Réfraction (régulière)

a. Aspect géométrique : lois de la réfraction

Le plan contenant le rayon incident et le rayon réfracté est perpendiculaire à la surface. Ce plan contient aussi le rayon réfléchi, et la normale à la surface.

L'angle de réfraction est donné par la loi de Snell-Descartes :

$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$

Remarques :

- Lorsque le rayon incident est normal à la surface, la lumière traverse la surface sans être déviée ($i\,2 = i\,1 = 0$).
- Lorsque la lumière passe du milieu le moins réfringent au milieu le plus réfringent, elle se rapproche de la normale à la surface (en effet, si $n\,2 > n\,1$ et si $i\,1 \neq 0$, alors $\sin i2 < \sin i\,1 \Rightarrow i\,2 < i\,1$).
- Lorsque la lumière passe du milieu le plus réfringent au milieu le moins réfringent, elle s'éloigne de la normale à la surface.

3. Absorption de la lumière

Dans une onde lumineuse se propageant dans la matière, le nombre de photons diminue progressivement. Ceux-ci sont peu à peu absorbés par la matière et lui communiquent leur énergie en disparaissant. L'intensité de la lumière diminue au fur et à mesure de sa propagation.

. Loi de BeerBouger

1. Dans un milieu homogène, l'intensité lumineuse diminue exponentiellement en fonction de l'épaisseur traversée.

I_0 = intensité au début , $I(x)$ = intensité au bout d'un parcours x ($x = OM$)

On a : $I(x) = I_0\, e^{-ax}$

où a est une constante caractéristique du milieu appelée « coefficient d'absorption du milieu ». On peut aussi écrire la loi sous la forme suivante :

$T(x) = I(x)/I_0 = e^{-ax}$

où T est le facteur de transmission (ou transmittance) sur une distance x .

. Sélectivité de l'absorption

Un milieu coloré absorbe inégalement les diverses composantes de la lumière : son coefficient d'absorption dépend de λ. On définit alors la transmittance spectrale à la longueur d'onde λ :

$T_\lambda(x) = e^{-a_\lambda x}$

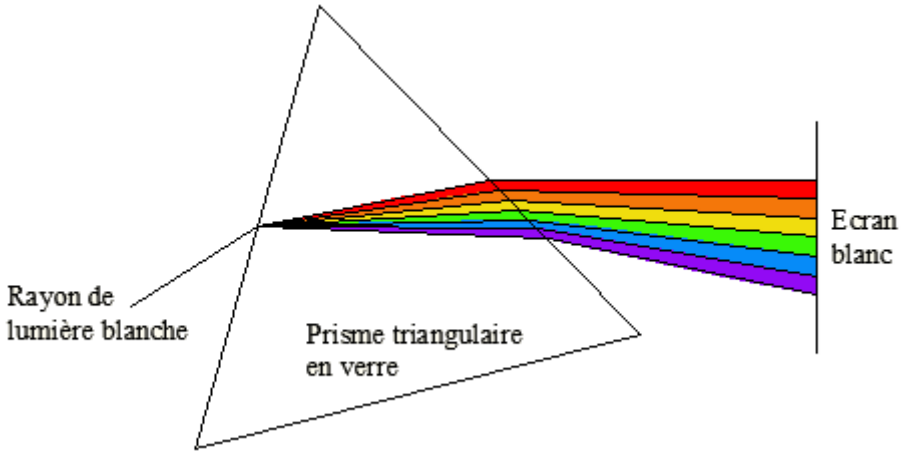
Remarque :

Lorsqu'un photon est absorbé, l'énergie qui est fourni à la matière augmente, la plupart du temps, la température du matériau mais elle peut aussi casser une liaison chimique. Si E est suffisamment grand, on peut alors avoir, suivant les cas, des décolorations, des jaunissements, etc...

IV. Dispersion de la lumière :

1. Par un prisme :

Soit un prisme d'angle A :



Au passage du prisme la lumière blanche se décompose :

➢la lumière arrive sur la face d'entrée : elle est réfractée

➢elle traverse le prisme en ligne droite

➢elle est à nouveau réfractée quand elle sort par l'autre face

➢Le phénomène de décomposition de la lumière par un prisme montre que les angles de réfraction sont différents pour les radiations qui composent la lumière. On en déduit que l'indice du verre dépend de la longueur d'onde de la lumière. On dit que le milieu (ici le verre) est un milieu dispersif. L'indice de réfraction du verre n dépend de la longueur d'onde : plus λ est petit, plus la déviation est grande.

2. Conséquences de la réfraction par l'atmosphère de la Terre

a. Les arcs-en-ciel

Les gouttes de pluie en suspension dans l'air dispersent la lumière.

b. Les mirages

Il en existe de 2 types : les mirages chauds et les mirages froids.