Contents

Chapitre 1 : Bases de l'optique géométrique

Lumières et sources lumineuses

Lumière et ondes électromagnétique

Un champ électromagnétique est créé par des particules chargées, généralement en mouvement

On représente le rayonnement électromagnétique par une onde électromagnétique

Un rayonnement électromagnétique est caractérisé par une fréquence de vibrations (notée f ou ν). Un rayonnement ne contenant qu'une seule fréquence est dit monochromatique, ou polychromatique s'il en contient plusieurs.

Dans le vide, une onde électromagnétique se propage à la vitesse de la lumière

La longueur d'onde dans le vide d'une onde électromagnétique de fréquence ν est définie par la relation $\lambda = \frac{c}{\nu}$ (avec la longueur d'onde en mètres).

Le champ des ondes électromagnétiques visibles est situé entre 400 et 800 nanomètres de longueur d'onde. On a le spectre suivant.

Bornes	Gamma	Rayons X	Ultraviolets	Visible	Infrarouges	Micro-ondes	Autres	Radio
Plus petit	-	10 pico	10 nm	380 nm	780 nm	1 mm	30 cm	1 m
Plus grand	10 pico	10 nm	380 nm	780 nm	1 mm	30 cm	1 m	-

La lumière est une onde électromagnétique, qui correspond dans le vide approximativement au spectre de longueur d'onde 400 nanomètres (violet) et 800 nanomètres (rouge)

Sources lumineuses

Une source primaire de lumière est une source qui émet sa propre lumière. Une source secondaire est une source qui ne produit pas de lumière mais ne fait que la retransmettre.

Sources thermiques

Tout corps ou objet de température non nulle (exprimée en Kelvin) émet des ondes électromagnétiques. Ces corps chauds sont historiquements appelés corps noirs. Le spectre d'émission d'un tel corps est appelé spectre d'émission du corps noir et on parle de source thermique.

Loi de Wien : $\lambda_{max} \cdot T = constante$

> Si l'objet est suffisamment chaud, l'essentiel du rayonnement est contenu dans le spectre visible et la lumière est alors perçue comme blanche par l'oeil.

Spectres ou lampes spectrales

> Le rayonnement d'un spectre est discret. Seules des raies, centrées autour de certaines longueurs d'ondes, sont émises

Lasers

> Laser signifie "Light Amplification by Stimulation Emission of Radiation"

Le rayonnement émis par un laser est proche d'un rayonnement monochromatique.

Bilan qualitatif

Les spectres d'analyses de chacun de ces rayonnements présentent des largeurs différentes, de la plus large et étalée à la plus étroite et longiligne : Thermique, Spectral, Laser, Monochromatique (seulement théorique).

Indice optique

Définition

> L'indice optique ou indice de réfraction d'un milieu transparent est le rapport entre la vitesse de la lumière et la vitesse de la lumière dans le milieu

La formule est donc notée $n_{\text{milieu}} = \frac{c}{c_{\text{milieu}}}$

Valeurs courantes:

- $n_{\text{air}} = 1.00$ (commence à changer à partir de la quatrième décimale)
- $n_{\text{eau}} = 1.33$
- $n_{\text{verre}} = 1.5 \text{à} 1.8$

Milieu dispersif

La fréquence ν d'un onde électromagnétique est indépendante du milieu qu'elle traverse (mais la vitesse peut changer).

> Un milieu est dit dispersif lorsque c_{milieu} dépend de la fréquence ν de l'onde électromagnétique le traversant. Dans ce cas, n_{milieu} dépend aussi de ν.

Exemple : le verre est un milieu dispersif, c'est pourquoi chaque couleur de la

lumière a une vitesse différente selon sa fréquence. On peut lier cette relation par la loi de Cauchy, $n_{lambda} = A + \frac{B}{\lambda^2}$ (A et B déterminés expérimentalement).

Conséquences sur les longueurs d'onde

$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{c_{\text{milieu}}}{\lambda_{\text{milieu}}} \Leftrightarrow \lambda_{\text{milieu}} = \lambda \frac{c_{\text{milieu}}}{c}$ or $n_{\text{milieu}} = \frac{c}{c_{\text{milieu}}}$, donc $\lambda_{\text{milieu}} = \frac{\lambda}{n_{\text{milieu}}}$

Sa longueur d'onde λ_{milieu} dans un milieu d'indice optique $n_{\text{indice milieu}}$

Propriété : $\lambda_{milieu} = \frac{\lambda_{onde}}{n_{milieu}}$

Modèle de l'optique géométrique

Notion de rayon lumineux

> Un rayon lumineux matérialise la propagation de la lumière. On le représente par un trait muni d'une flèche qui indique le sens de propagation de la lumière

Cadre de l'optique géométrique

On suppose que les milieux traversés sont :

- Transparents
- Homogènes
- Isotropes (même propriétés dans toutes les directions)

Propagation en ligne droite

On ne tient pas compte du caractère ondulatoire de la lumière. Tant que les rayons ne rencontrent pas d'obstacles, ils se propagent en ligne droite (on ne constate pas de mirages chauds par exemple, puisque le milieu est homogène).

Indépendance de la lumière

Il n'y a ni diffraction, ni interférences.

Retour inverse de la lumière

Si un point A éclaire un point B, alors une source de lumière placée en B éclaire A.

Limites du modèle

- Pas de description de la diffraction et des interférences
- Pas de description de la polarisation (fait que le champ électrique tourne dans l'espace)
- Pas de description des mirages (effets de milieux non homogènes)

Loi de Snell-Descartes

Énoncé des lois

> On appelle dioptre la surface de séparation entre deux milieux d'indices différent.

Par exemple, la surface de l'eau dans un environnement entre l'eau (d'indice 1,33) et l'air (d'indice 1) est un dioptre. Le dioptre n'est pas toujours une ligne droite, puisqu'il consiste en une courbe pour une bulle de savon ou une goutte d'eau.

> La normale à un dioptre en un point est la droite passant par ce point et perpendiculaire au plan local du dioptre.

Énoncé des lois : Soit un dioptre entre un milieu d'indice n_1 et un autre milieu d'indice n_2. Un rayon incident arrivant sur le dioptre est réfléchi par le dioptre, et réfracté de l'autre côté du dioptre.

- Tous les rayons sont situés dans le même plan, contenant la normale au dioptre et le rayon incident : c'est le **plan d'incidence**.
- Le rayon réfléchi possède un angle opposé au rayon incident, donnant l'angle $r = -i_1$.
- L'angle du rayon réfracté vérifie $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$.

Première application

Avec une surface entre l'air (n = 1) et le verre (n = 1,5), et un rayon $i_1 = 40°$. On peut trouver i_2 à l'aide de la troisième loi de Snell-Descartes : $n_\text{air} \sin i_1 = n_\text{verre} i_2$, soit $\sin i_2 = \frac{n_\text{air}}{n_\text{verre}} \sin i_1 \Leftrightarrow i_2 = \arcsin(\frac{n_\text{air}}{n_\text{verre}}\sin i_1)$. L'application numérique nous donne ainsi $i_2 \approx 25°$

Angles limite

Angle de réfraction limite

$n_1 < n_2$, et $i_1 > i_2$. Avec l'angle maximal du rayon incident 90°, on a avec la 3ème loi de Snell-Descartes $i_2 = \arcsin \frac{n_1}{n_2}$.

Pour deux milieux d’indices n_1 et n_2, on dit que le milieu 1 est plus réfringent que le milieu 2 si $n_1 > n_2$.

Pour une réfraction vers un milieu plus réfringent, l’angle de réfraction limite correspond à un angle d’incidence maximal et vérifie $i_{2\text{lim}} = \arcsin \frac{n_1}{n_2}$.

Phénomène de réflexion totale

Lorsque l’indice $n_1 > n_2$, $i_1 < i_2$. Lorsque $i_1 > i_{1\text{lim}}$, les rayons réfléchis et réfractés sont confondus et tous deux réfléchis.

L’angle d’incidence limite $i_1\text{lim}$ est l’angle d’incidence au delà duquel le rayon incident est totalement réfléchi. On parle de réflexion totale.

Ce phénomène se retrouve dans la brillance des diamants ou dans le fonctionnement de la fibre optique.

Principe de Fermat

Pour relier deux points a et b, la lumière (le rayon lumineux) suit un chemin dont le temps de parcours est localement extrémal (maximal ou minimal).

Ce principe est un principe de moindre effort de la propagation des rayons lumineux.

Propagation en ligne droite dans les milieux homogènes

Dans un milieu homogène, la lumière se déplace toujours à la même vitesse (car l’indice optique est le même partout) et le chemin le plus rapide entre deux points est le chemin le plus court (en termes de distance), soit une ligne droite.

Principe de retour inverse de la lumière

Si un chemin est extrémal dans un sens de parcours, il l’est également dans l’autre.

Lois de Descartes

Voir prochain TD

Application : La fibre optique à saut d’indice

Principe

Une fibre optique à saut d’indice est constituée d’un tube central, appelé cœur transparent, d’indice optique $n_\text{cœur}$, entouré d’un gaine d’indice optique n_gaine.

Il y a réflexion totale avec $n_\text{cœur} > n_\text{gaine}$. On cherche à obtenir une condition sur Θ pour qu’il y ait réflexion totale en I. Pour avoir réflexion totale en I, il faut que $i > i_\text{lim}$, donc que $\sin i_\text{lim} = \frac{n_\text{gaine}}{n_\text{cœur}}$. On a $\Theta ’ + i + \frac{\Pi}{2} = \Pi \Leftrightarrow i = \frac{\Pi}{2} - \Theta ’$. La condition $i > i_\text{lim}$ s’écrit $\frac{\Pi}{2} - \Theta’ > i_\text{lim}$ $\Leftrightarrow \Theta’ < \frac{\Pi}{2}i_\text{lim}$. $\sin(\Theta)$ est croissant sur $[0; \frac{\Pi}{2}]$. De plus, on a $\sin\Theta’ < \cos i_\text{lim}$. On 0, d’après la loi de Descartes, $n_\text{air} \sin \Theta = n_\text{cœur} \sin\Theta’$. Or, $n_\text{air} = 1.00$ donc $\sin\Theta = n_\text{cœur} \sin\Theta’$. Or $\sin\Theta’ < \cos i_\text{lim}$. Donc $\sin\Theta < n_\text{cœur} \cos i_\text{lim}$. Or $\sin i_\text{lim} = \frac{n_\text{gaine}}{n_\text{cœur}}$ et $\cos^2 i_\text{lim} + \sin^2 i_\text{lim} = 1$ $\Leftrightarrow \cos^2 i_\text{lim} = 1 - \sin^2 i_\text{lim}$, Donc $\cos^2 i_\text{lim} = 1 - (\frac{n_\text{gaine}}{n_\text{cœur}})^2$ $\Leftrightarrow \cos i_\text{lim} = \sqrt{1 - (\frac{n_\text{gaine}}{n_\text{cœur}})^2}$ Donc $\sin \Theta < n_\text{cœur} \sqrt{1 - (\frac{n_\text{gaine}}{n_\text{cœur}})^2}$ $\Leftrightarrow \sin \Theta < \sqrt{n_\text{cœur}^2 - n_\text{gaine}^2}$

Propriété : $\sin\Theta < \sqrt{n_\text{cœur}^2 - n_\text{gaine}^2}$. On appelle cette valeur Ouverture Numérique, telle que $O.N. = \sqrt{n_\text{cœur}^2 - n_\text{gaine}^2}$

Dispersion intermodale

Rayon le plus rapide : $\Theta = 0$, le temps de parcours est alors $T__1 = \frac{L}{c__\text{cœur}}$, aussi noté $T__1 = \frac{L n__\text{cœur}}{c}$

Rayon le plus lent : $\Theta = \Theta__\text{max}$, la longueur du parcours est alors $L__2 = \frac{L}{\sin(i__\text{lim})}$, et $T__2 = \frac{L__2 n__\text{cœur}}{c} = \frac{L n__\text{cœur}}{c}$ $= \frac{L n__\text{cœur}}{c \sin i__\text{lim}}$. Or, $\sin i__\text{lim} = \frac{n__\text{gaine}}{n__\text{cœur}}$, donc $T__2 = \frac{L n__\text{cœur}^2}{c n__\text{gaine}}$.

Différences des temps de parcours : $\Delta T = T__2 - T__1$ $= \frac{L}{c} \frac{n__\text{cœur}^2}{n__\text{gaine}} - \frac{L}{c}n__\text{cœur}$ $= \frac{L}{c} \frac{n__\text{cœur} (n__\text{cœur} -n__\text{gaine})}{n__\text{gaine}}$.

On peut ainsi avoir les valeurs suivantes :

- $L = 10.0 km$
- $n__\text{cœur} = 1.62$
- $n__\text{gaine} = 1.52$
- $\Delta N = 0.560$
- $\Delta T = 3.53 microsecondes$

Le signal de la fibre optique peut ainsi se distordre et se décaler dans le temps, posant de nombreux défis techniques.