

OS1 : ONDE LUMINEUSE — LOIS DE SNELL—DESCARTES

Quelques repères historiques

Antiquité	• Notion de rayon lumineux, application aux miroirs (EUCLIDE, PTOLÉMÉE).
XVI ^e siècle	• Naissance de l'optique géométrique expérimentale (dioptres, prismes, lentilles).
XVII ^e siècle	• Lunette de GALILÉE (1564-1642) en 1609. • Lois de la réfraction à travers un dioptre par SNELL (1580-1626) en 1621 puis par DESCARTES (1596-1650) en 1637. • Principe de FERMAT (1601-1665) qui justifie en 1650 les lois de l'optique géométrique.
XVIII ^e et XIX ^e siècle	• Une conception ondulatoire retrouve les lois géométriques (HUYGENS (1629-1695)). • FRESNEL(1788-1827) impose cette conception ondulatoire avec les expériences d'interférences et de diffraction. • Vers la fin du XIX^esiècle MAXWELL (1831-1879) et HERTZ (1857-1894) placent la lumière dans la gamme des ondes électromagnétiques.
XX ^e siècle	• En 1905 EINSTEIN (1879-1955) remet en cause la théorie ondulatoire et adopte une théorie corpusculaire pour expliquer l'effet photoélectrique. • Conciliation des deux théories réalisée par DE BROGLIE en 1924 : notion de dualité onde corpuscule. • L'optique quantique supprime les dernières contradictions entre les modèles corpusculaires et ondulatoires (FEYNMAN (1918-1988)).

I Généralités sur la lumière

I.1 Dualité onde-corpuscule

Les deux théories ondulatoire et corpusculaire de la lumière ne s'opposent pas mais se complètent : **La lumière a une nature duale.**

I.2 Modèle ondulatoire de la lumière

I.2.a) Description

La lumière est décrite par une onde électromagnétique dont la propagation est régie par les équations de MAXWELL. L'onde électromagnétique est composée d'un champ électrique $\vec{E}$ et d'un champ magnétique $\vec{B}$ oscillant à la fréquence ν (pulsation : $\omega = 2\pi\nu$, période temporelle : $T = \frac{1}{\nu}$).

I.2.b) Indice de réfraction

La vitesse de propagation de l'onde dépend du milieu traversé. Dans un milieu autre que le vide elle est inférieure à la célérité de la lumière c : $v = \frac{c}{n}$ avec $c = 299\,792\,458\,\text{m s}^{-1} \approx 3 \times 10^8\,\text{m s}^{-1}$.

La grandeur n est appelée indice de réfraction du milieu et est sans dimension :

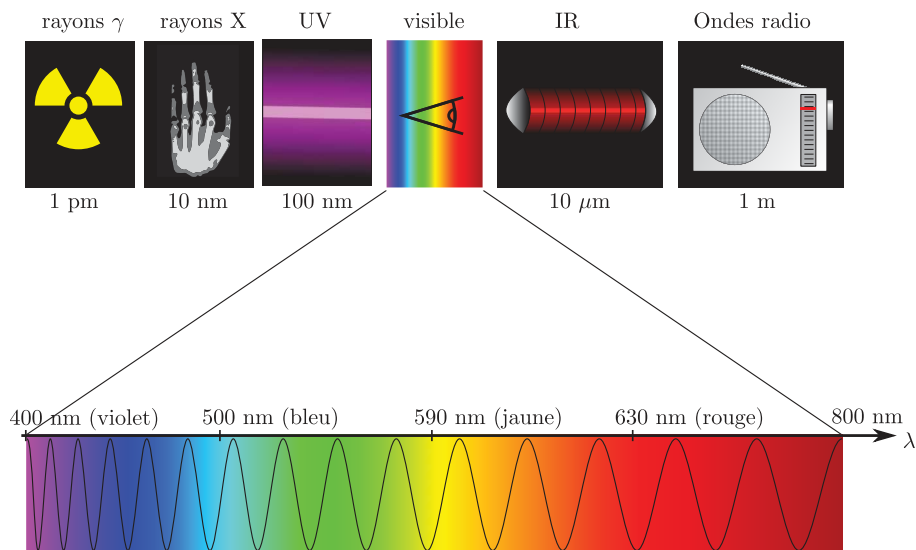
- vide : $n = 1$
- eau liquide : $n = 1,33$
- air sec : $n = 1,00027$
- verre : $n \approx 1,5$

En général l'indice de réfraction dépend de la longueur d'onde selon la loi de Cauchy : $n = A + \frac{B}{\lambda^2}$.

Si les indices de réfraction de deux milieux vérifient $n_1 > n_2$, on dit que le milieu 1 est plus réfringent que le milieu 2.

I.2.c) Longueur d'onde

La longueur d'onde de la lumière correspond à la période spatiale de l'onde : $\lambda = vT = \frac{cT}{n} = \frac{c}{\nu n}$.



On constate que la lumière visible n'est qu'une infime partie de la gamme des ondes électromagnétiques.

I.3 Modèle corpusculaire de la lumière

La lumière est composée de photons (particule de masse nulle se déplaçant à la vitesse de la lumière) transportant chacun l'énergie $W = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$ où h est la constante de Planck : $h = 6,62 \times 10^{-34}$ J.s.

II Sources lumineuses

La lumière est émise à partir de sources, qui présentent des caractéristiques très différentes selon leur constitution. Un des paramètres les plus utilisés pour les différencier est d'observer le spectre émis par ces sources.

II.1 Sources de lumière blanche

Les sources de lumière blanche possèdent un spectre continu en fréquence. Par exemple la lumière émise par le soleil, une lampe à incandescence ou une lampe halogène.

II.1.a) Généralités

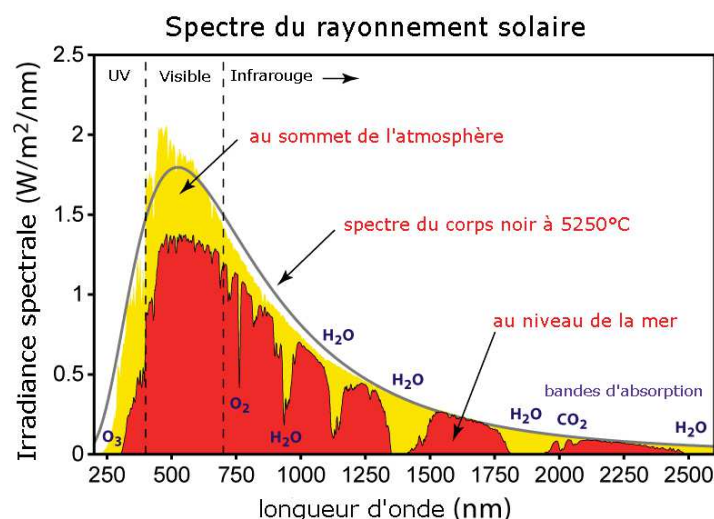
Tout corps maintenu à température constante émet un spectre d'émission continu sur une plage étendue de longueur d'onde (rayonnement thermique). La longueur d'onde qui possède le maximum d'intensité lumineuse est fonction de la température selon la loi de Wien :

$$\lambda_{max}T = C \quad \text{avec} \quad C = 2,898 \times 10^{-3} \text{ K m}$$

avec T la température en kelvin.

II.1.b) Lumière émise par le Soleil

Le spectre émis par le Soleil peut être retrouvé à partir de la relation précédente en se plaçant au dessus de l'atmosphère en considérant une température de surface du soleil égale à 5 500 K. Le spectre reçu à la surface de la Terre diffère en raison de l'absorption d'éléments contenu dans l'atmosphère.



II.1.c) Lampe à incandescence

Le principe des lampes à incandescence repose également sur le rayonnement thermique. Un filament métallique est placé dans une atmosphère inerte, dépourvue de dioxygène. Il est ensuite porté à haute température sans subir de combustion. Par exemple, dans les lampes à

incandescence, les filaments de tungstène sont portés à une température de 2900 K. Le spectre obtenu possède une partie dans le visible mais la plus grande partie de l'énergie est rayonnée dans l'infrarouge. Par conséquent le rapport entre l'énergie lumineuse reçue et la puissance électrique consommée est faible ce qui explique le remplacement des lampes à incandescence par des lampes fluocompactes qui consomment moins d'énergie.

Les lampes halogènes utilisent le même principe mais la température atteinte par le filament est plus importante (4500 K) grâce à une atmosphère active. La longueur d'onde associée à l'intensité maximale est cette fois dans le visible.

II.2 Lampe spectrale

Les lampes spectrales sont constituées d'une ampoule renfermant une vapeur atomique. Les propriétés de la lumière émise dépendent essentiellement de l'élément chimique concerné. Par exemple les lampes à vapeur de sodium, de cadmium, mais également les lampes fluocompactes qui utilisent le mercure.

Le principe de fonctionnement de ces lampes repose sur l'excitation ou l'ionisation du gaz par un arc électrique. La désexcitation de l'atome s'accompagne d'une émission de lumière de longueur d'onde définie selon les niveaux de quantifications de l'atome considéré $\lambda = \frac{hc}{E_2 - E_1}$ avec h la constante de Planck ($h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s).

La caractéristique principale des lampes spectrales est le caractère discret de leur spectre d'émission.

Par exemple, les lampes à vapeur de sodium (éclairage public) possèdent principalement un doublet jaune (589,0 et 589,6 nm). Les lampes à vapeur de mercure possèdent entre autre une raie rouge à 623,4 nm, une raie verte à 546,1 nm un doublet jaune (579,1 et 577 nm) une raie bleue à 435,6 nm et une raie violette à 404,7 nm.

Les lampes fluocompactes possèdent sur leur surface des phosphores qui absorbent une partie de rayonnement pour réémettre sur une autre longueur d'onde pour reproduire au maximum un spectre continu.

II.3 Laser

Le laser est une source de rayonnement quasi-monochromatique qui possède un grand nombre d'applications dans la vie de tous les jours (télécommunication, lecture de CD/DVD...). Ce sigle : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation signifie en français amplification de lumière par émission stimulée. Le principe de fonctionnement repose sur le principe de l'émission stimulée qui permet d'avoir un faisceau quasi-monochromatique et un pinceau lumineux très directif.

Il existe différents types de laser, les laser que l'on utilisera en travaux pratiques seront des lasers à gaz Hélium-Néon qui émettent à 632,8 nm et des lasers à semiconducteurs.

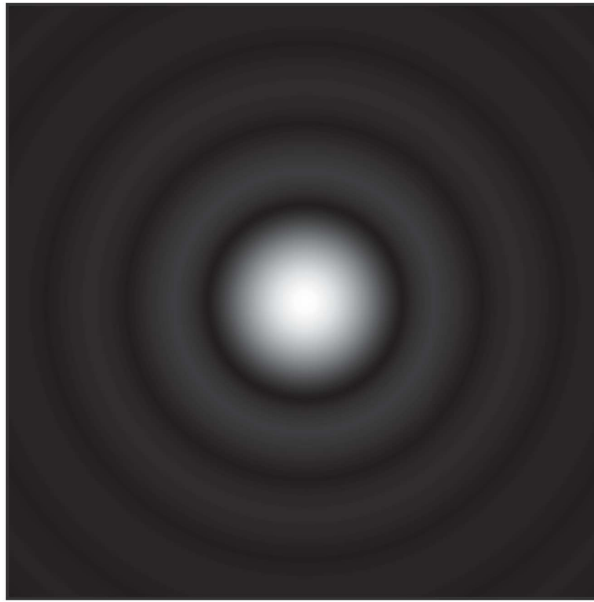
III Rayon lumineux : base de l'optique géométrique

III.1 Diffraction en optique

III.1.a) Diffraction à l'infini

Les dispositifs optiques introduisent une limitation de l'extension spatiale des ondes lumineuses. En effet les éléments optiques (capteur, lentilles, miroirs...) ont une extension finie et ne collecte parfois qu'une partie du faisceau. Il faut donc examiner dans quelle mesure le fait de limiter l'extension modifie les propriétés de l'onde c'est à dire étudier la diffraction des ondes lumineuses.

Pour quantifier l'influence de la diffraction en optique, on éclaire un diaphragme (ouverture circulaire) par un faisceau parallèle monochromatique de longueur d'onde λ_0 . On observe alors sur un écran à grande distance (diffraction à l'infini) la figure ci dessous.



Si on se limite à la tache centrale de diffraction (tache d'Airy), l'étude effectuée pour différents diamètres d'ouverture met en évidence les propriétés suivantes :

- L'étalement de la lumière est imperceptible lorsque le diamètre d est très supérieur à λ_0
- L'étalement est d'autant plus grand que $\frac{d}{\lambda_0}$ diminue.
- Le demi angle au sommet du cône délimitant l'onde diffractée vérifie la relation $\sin \theta = 1,22 \frac{\lambda_0}{d}$.

III.1.b) Cas d'un faisceau laser

Le faisceau d'un laser n'est pas parfaitement cylindrique mais diverge peu à peu au cours de sa propagation. Ce phénomène s'explique à partir du phénomène de diffraction en considérant le faisceau limité par un diaphragme fictif de rayon e qui correspond également au rayon du faisceau. On peut parler alors d'autodiffraction du faisceau laser.

III.2 Approximation de l'optique géométrique

Les lois de l'optique géométrique restent valables tant que les instruments utilisés sont de grandes tailles par rapport à la longueur d'onde. Cela revient à négliger le phénomène de diffraction.

L'optique géométrique s'intéresse seulement aux rayons lumineux et leur applique des lois simples ayant pour origine des constatations géométriques sans considérer les aspects ondulatoires ou corpusculaires de la lumière.

III.3 Notions de rayons lumineux

On suppose que la lumière est constituée d'une infinité de rayons lumineux indépendants et on considère dans la suite du cours un milieu homogène transparent et isotrope (MHTI).

Milieu homogène : Un milieu est homogène lorsque les propriétés physiques (composition, densité, indice de réfraction...) sont les mêmes en tout point du milieu.

Milieu transparent : Un milieu est transparent lorsqu'il est non absorbant.

Milieu isotrope : Un milieu est isotrope lorsque les propriétés physiques sont identiques dans toutes les directions de propagation du rayon lumineux.

Dans un MHTI, la lumière se propage rectilignement :

- Les rayons lumineux sont des demi-droites issues de la source lumineuse.
- Dans une suite de milieux homogènes, le trajet d'un rayon lumineux sera formé d'une succession de segments de droite.

III.4 Propriétés des rayons lumineux

III.4.a) Indépendance des rayons lumineux

Soient deux sources de lumière S_1 et S_2 émettant des rayons lumineux. La répartition lumineuse est la somme des répartitions individuelles.

III.4.b) Principe de Fermat

Dans un MHTI, la lumière minimise son temps de parcours pour aller d'un point A à un point B . $\tau_{AB} = \frac{n_{AB}}{c}$. On retrouve ainsi que la lumière se propage en ligne droite.

III.4.c) Principe du retour inverse de la lumière

La trajectoire suivie par la lumière entre deux points est indépendante du sens de propagation de la lumière.

IV.5 Milieu d'indice variable

La loi de la réfraction s'applique à des milieux non homogènes à condition de les découper en tranches élémentaires d'indices infiniment voisins.

Mirages inférieurs

Ce phénomène est lié au fait que le sol, surchauffé par un rayonnement intense, provoque la dilatation des couches d'air en contact avec lui. Par suite de l'action du Soleil, le sable s'échauffe très fortement, tandis que l'air ne s'échauffe moins. Seule la couche d'air située au voisinage du sable s'échauffe par contact. L'air se trouve donc formé de couches, inégalement échauffées, inégalement denses, ayant par conséquent des indices différents. Aux couches les plus basses, qui sont les plus légères, correspondent les indices les plus faibles. Certains rayons obliques provenant du ciel peuvent se courber au voisinage du sol avant d'arriver sur l'œil d'un observateur. L'observateur a alors l'impression de voir le ciel sur le sable. En effet lorsqu'il reçoit un rayon lumineux, l'œil ou plutôt le cerveau va chercher l'origine de ce rayon en faisant le chemin à l'envers. Il prolonge donc le rayon reçu pour trouver son origine. On dit que l'œil fait une extrapolation sur l'origine du rayon. Le prolongeant, il n'a pas toujours l'origine exacte !



Mirages supérieurs

Si le sol est plus froid que l'air qui est en contact avec lui, alors la température des couches aériennes ainsi que l'indice croît rapidement avec la hauteur. Cette situation peut s'observer en mer ; les navigateurs observent des images renversées de sites ou de navires éloignés qui se dessinent sur l'atmosphère.

