

GENERALITES SUR L'OPTIQUE

I. INTRODUCTION

L'optique est le domaine de la physique qui s'intéresse aux propriétés de la lumière. L'œil n'est sensible qu'aux radiations visibles mais l'utilisation d'autres récepteurs (plaque photographique, cellule photoélectrique) permettent l'étude d'autres radiations telles que les infrarouges, les ultraviolets ou encore les rayons X.

Des phénomènes physiques tels que l'apparition d'un arc-en-ciel ou l'observation d'un mirage sont expliqués dans le cadre de l'optique.

L'étude de la propagation de la lumière et des mécanismes de formation des images a permis de fabriquer de nombreux instruments d'optique tels que la lunette astronomique, le microscope ou encore de corriger des défauts de la vision.

La lumière est également un phénomène de transport d'énergie et d'information utilisé entre autres dans les fibres optiques.

L'optique commence à être étudiée dès l'antiquité comme nous allons le voir dans l'historique qui suit.

II. HISTORIQUE

Antiquité	Euclide, Ptolémée	Notion de rayon lumineux Théorie des miroirs
XI ^{ème} siècle	Alhazen	Origine de la lumière extérieure à l'œil Notions d'objet et d'image Expériences avec lentilles et miroirs
1564 - 1642	Galilée	Lunette astronomique
1580 - 1626	Snell	Lois de la réfraction
1596 - 1650	Descartes	Lois de la réfraction Description corpusculaire de la lumière
1601 - 1665	Fermat	Principe du moindre temps
1642 - 1727	Newton	1704 : Publication d'Opticks (réflexion, réfraction, diffraction et théorie des couleurs)
1629 - 1695	Huygens	Description ondulatoire de la lumière qui permet de retrouver les lois de Snell-Descartes
1788 - 1827	Fresnel	Etude des phénomènes de diffraction et d'interférences
1831 - 1879	Maxwell	Unification de l'optique aux phénomènes électromagnétiques
1858 - 1947	Planck	Rayonnement du corps noir
1879 - 1955	Einstein	Notion de photon Explication de l'effet photoélectrique

On s'aperçoit que différentes conceptions s'affrontent sur la nature ondulatoire ou corpusculaire de la lumière.

De plus, l'optique peut se traiter suivant deux approches différentes : l'optique géométrique et l'optique physique que nous allons présenter dans la suite.

III. OPTIQUE GEOMETRIQUE – OPTIQUE PHYSIQUE

1. Optique géométrique

Historiquement la plus ancienne (d'Euclide à Newton), l'optique géométrique utilise comme outil **le rayon lumineux** qui représente la direction de propagation de l'énergie lumineuse et permet dans la plupart des cas la construction de l'image d'un objet par un système optique.

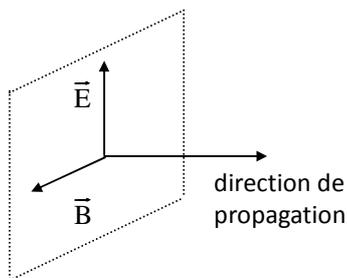
Dans cette approche, **la nature de la lumière n'est pas prise en compte**. Cette optique fera l'objet du programme de première année et sera développée dans les prochains chapitres.

2. Optique physique

Dans cette approche, **la nature de la lumière est prise en compte**.

a) Modèle ondulatoire (d'Huygens à Maxwell)

La lumière est décrite comme un phénomène vibratoire de nature électromagnétique, c'est à dire un champ électrique et un champ magnétique variant dans le temps et se propageant **dans le vide** à la vitesse $c = 299792458 \text{ m.s}^{-1} \approx 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$.



L'onde est transversale (la vibration s'effectue perpendiculairement à la direction de propagation).

L'intensité lumineuse est proportionnelle au carré de la norme de \vec{E} .

Cette description permet d'interpréter tous les phénomènes liés à la propagation de la lumière. L'optique géométrique est retrouvée et les phénomènes d'interférence et de diffraction sont expliqués. Ces derniers seront étudiés en seconde année.

- **Grandeurs caractéristiques associées** (voir cours de terminale)

Une onde monochromatique (onde progressive sinusoïdale), émise en O ($x = 0$) et se propageant à la vitesse v dans la direction $x'x$ peut-être représentée, en un point M(x) à l'instant t, par la fonction d'onde :

$$s(x, t) = S_m \cdot \cos\left[\omega\left(t - \frac{x}{v}\right)\right] = S_m \cdot \cos\left[\omega t - \frac{\omega x}{v}\right] = S_m \cdot \cos\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right]$$

Pour une onde électromagnétique se propageant suivant l'axe Ox : $s(x, t) = \vec{E}(x, t)$ et $S_m = \vec{E}_m$

Cette onde présente une *double périodicité* :

- *temporelle* (intrinsèque) : $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f}$ où **T désigne la période temporelle** (unité SI : s), **f la**

fréquence temporelle (s^{-1} ou Hz) et ω **représente la pulsation** de l'onde ($\text{rad. } s^{-1}$; dimension :

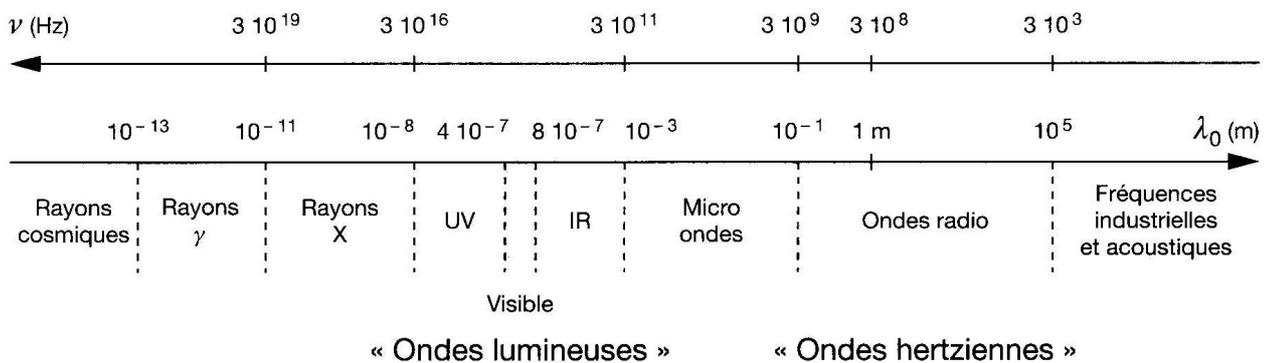
$$[\omega] = \left[\frac{2\pi}{T}\right] = \frac{1}{[T]} = T^{-1}.$$

- *spatiale* (extrinsèque : liée au milieu de propagation par l'intermédiaire de la vitesse v) :

$\lambda = vT = \frac{2\pi v}{\omega} = \frac{1}{\sigma}$ où **λ désigne la longueur d'onde ou période spatiale** (m) et **σ le nombre d'onde ou fréquence spatiale** (m^{-1}).

- **Spectre électromagnétique**

Dans le vide $v = c$ ($\approx 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$) et $\lambda_0 = cT = \frac{c}{f}$. On constate que les domaines en fréquence (f notée aussi ν «nu» dans l'alphabet grec) sont inversés par rapport aux longueurs d'onde comme on peut le voir sur le spectre ci-dessous.



La lumière visible correspond à un domaine très restreint du spectre électromagnétique : longueurs d'onde dans le vide comprises entre **400 et 780 nm**.

couleur	longueur d'onde (nm)	fréquence (10^{14} Hz)
limite U.V.	400	7,50
violet	420	7,14
bleu	470	6,40
vert	530	5,70
jaune	580	5,17
orange	600	5,00
rouge	650	4,62
limite I.R.	780	3,85

- **Propagation de la lumière dans un milieu matériel**

L'intensité lumineuse diminue lors de sa propagation dans un milieu matériel : il s'agit du phénomène d'**absorption**. Ce phénomène, qui dépend de la longueur d'onde, explique la couleur de certains milieux. Nous supposons par la suite le milieu **transparent** (absence d'absorption), **homogène** (propriétés physiques identiques en tout point) et **isotrope** (propriétés identiques dans toutes les directions de l'espace).

La vitesse de propagation, v , de la lumière dans un milieu matériel, est inférieure à c vitesse de propagation dans le vide et dépend de la nature de ce milieu ainsi que de la fréquence de l'onde.

Le rapport $n = \frac{c}{v}$ définit l'**indice d'un milieu transparent** : $c > v, n > 1$.

Dans le milieu considéré la longueur d'onde λ vérifie : $n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_0 \times f}{\lambda \times f}$ soit $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$

Les milieux transparents usuels ont un indice qui suit la loi de Cauchy : $n(\lambda_0) = A + \frac{B}{\lambda_0^2}$ avec A, B constantes positives.

On constate que **n dépend de la longueur d'onde** : $\lambda_{0 \text{ bleu}} < \lambda_{0 \text{ rouge}}$, $n_{\text{bleu}} > n_{\text{rouge}}$ et $v_{\text{bleu}} < v_{\text{rouge}}$.

Ce phénomène - dit de **dispersion**- est mis en évidence lors de la décomposition de la lumière par un prisme.

Indices de différentes substances pour la radiation jaune du sodium ($\lambda_o = 589 \text{ nm}$)

Milieu							
Solide				liquide		gaz	
	diamant	chlorure de sodium	verres	glace	eau (20°C)	air sec	eau
Indice	2,417	1,544	1,5-1,9	1,309	1,33335	1,000293	1,000261

L'air, dont l'indice est pratiquement égal à 1, est un excellent modèle pour le vide.

b) Modèle quantique (début XXe siècle)

Le *modèle ondulatoire* ne permet pas d'interpréter les interactions entre rayonnement lumineux et matière (effet photoélectrique, spectres atomiques...).

La première interprétation de ces phénomènes est donnée par Planck (1900) et Einstein (1906) dans le cadre d'une *théorie corpusculaire*. L'énergie transportée par une radiation (fréquence f) est quantifiée. Le **quantum d'énergie, désigné par photon** (particule de masse nulle se déplaçant à la vitesse de la lumière

dans le vide), est égal à $\varepsilon = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda_o}$ avec h constante de Planck ($\approx 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$).

Le traitement le plus général de l'optique se fait dans le cadre de l'électrodynamique quantique. C'est dans ce cadre que la dualité onde/corpuscule sur la nature de la lumière est résolue notamment par Feynman (1918-1988).

3. Approximations

L'optique ondulatoire est une approximation de l'électrodynamique quantique permettant d'interpréter correctement tous les phénomènes de propagation de la lumière.

L'optique géométrique est une approximation de l'optique ondulatoire lorsque la longueur d'onde tend vers zéro, c'est à dire lorsque la dimension des obstacles limitant les faisceaux est grande devant la longueur d'onde.

IV. SOURCES LUMINEUSES

1. Sources de lumière blanche

Tout corps porté à la température T émet des ondes électromagnétiques : c'est le **rayonnement thermique**. Le spectre de la lumière émise est **continu** (il contient toutes les longueurs d'ondes d'un certain domaine du spectre électromagnétique). Cependant toutes les longueurs d'onde ne sont pas émises avec la même intensité : le maximum d'émission correspond à une longueur d'onde λ_{\max} reliée à T par la **loi de Wien** :

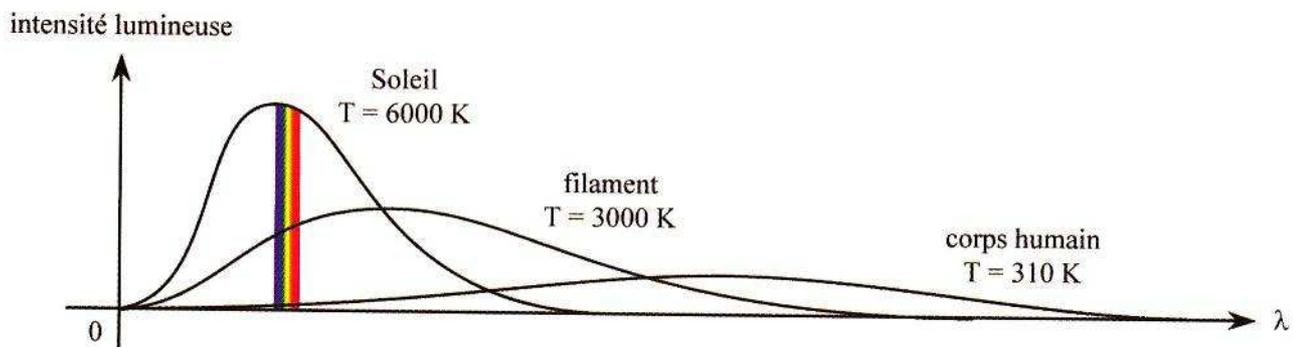
$$\lambda_{\max} T = 2,987 \cdot 10^{-3} \text{ K.m}$$

Exemples :

Outre le Soleil, les lampes à incandescence constituent une source de lumière blanche.

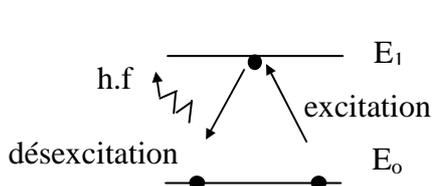
Dans une *lampe classique*, le filament de tungstène, placé dans une atmosphère gazeuse inerte, est porté à une température d'environ 3000 K. La plus grande partie de l'énergie émise se trouve dans l'infrarouge.

Un moyen d'augmenter la température (donc le rendement) est d'utiliser une *lampe halogène* dans laquelle le filament de tungstène est placé dans une atmosphère active (souvent de l'iode) permettant d'atteindre des températures plus élevées (≈ 4500 K) et donc de déplacer le spectre vers le visible.



2. Lampes spectrales

On réalise un arc électrique entre deux électrodes métalliques se trouvant dans une ampoule contenant un gaz (dihydrogène, vapeur de sodium, de mercure...). Les atomes du gaz contenu dans l'ampoule sont portés à un état excité non stable. Leur désexcitation **spontanée** s'accompagne de l'émission de raies spectrales. Nous étudierons en chimie, le spectre d'émission de l'atome d'hydrogène.



$$\Delta E = E_1 - E_0 = h.f$$

E_0 : énergie du niveau fondamental

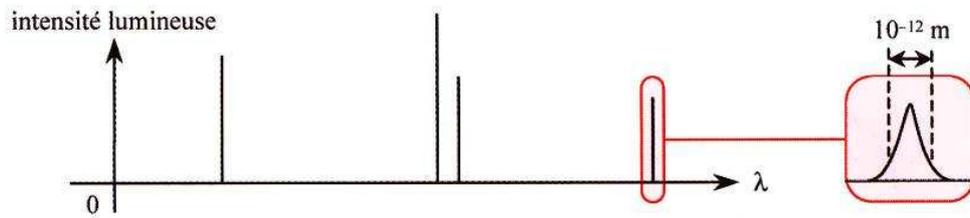
E_1 : énergie du niveau excité

f : fréquence du photon émis

h : constante de Planck

Le spectre de la lumière émise est donc **discontinu** et caractéristique des éléments présents dans le gaz : à chaque transition possible entre l'état fondamental et un état excité d'un élément donné correspond une raie du spectre.





Exemples :

Sodium : doublet jaune 589,0 nm et 589,6 nm.

Mercure : rouge 623,4 nm; doublet jaune 579,1 nm et 577,0 nm; vert 546,1 nm; bleu 435,8 nm et violet 404,7 nm.

Cadmium : rouge 643,8 nm; vert 508,6 nm; bleu 480,0 nm.

Hydrogène : violet 410,2 nm; indigo 434,2 nm; bleu 486,1 nm et rouge 656,3 nm.

3. Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

Le laser est souvent employé dans les expériences d'optique. Par opposition aux sources usuelles de lumière dont l'émission est spontanée, incohérente et non dirigée, le laser met en jeu une **émission stimulée** permettant d'obtenir un faisceau quasi-monochromatique et cohérent.

Le laser le plus courant est le laser Hélium – Néon de couleur rouge ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$). Il existe d'autres types de lasers : laser à colorant, diodes laser.

La puissance émise par le faisceau laser peut-être importante, il faut donc éviter de diriger le rayon vers l'œil car les cellules de la rétine peuvent être détruites de manière irréversible.

