

## Chap 1 : Notion d'onde lumineuse

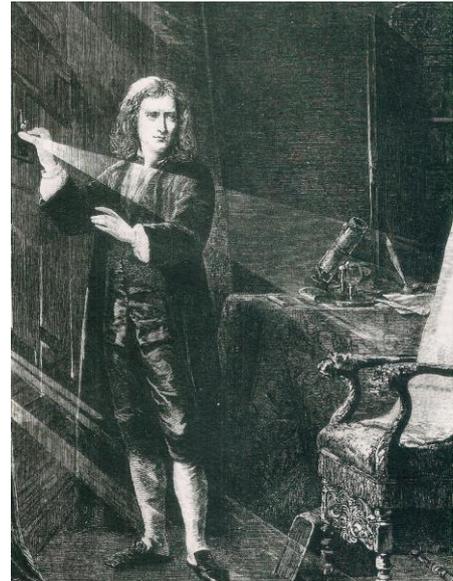
**Introduction :** Comme les ondes sonores, la houle ou les signaux électriques, la lumière est une onde. Dans ce chapitre, nous allons étudier les grandeurs physiques qui permettent de décrire le caractère ondulatoire de la lumière en introduisant la notion d'onde électromagnétique. Nous finirons ce chapitre par une définition du domaine de l'optique géométrique.

### I : Sources lumineuses

#### 1) Naissance de la spectroscopie

En 1665, pendant la « grande peste de Londres », Newton est confiné dans sa maison familiale de Woolsthorpe (dans le Lincolnshire à environ 180 km de Londres). S'interrogeant sur la nature de la lumière, il isola un fin pinceau lumineux grâce à une petite ouverture réalisée dans les volets de son salon. Il plaça alors un prisme « très dispersif » sur le chemin de la lumière et observa un « spectre lumineux » sur un écran placé dans la direction du faisceau.

Grâce à cette expérience, Newton réalisa que la lumière blanche est composée de « toutes les couleurs de l'arc en ciel ». Il venait de donner naissance à la spectroscopie. Un spectroscope est un système optique (composé d'un prisme ou d'un réseau lumineux, cf TP de physique de sup.) permettant de décomposer la lumière.



#### 2) Spectre d'une source lumineuse

##### -a- Présentation

La lumière est « un paquet d'onde » et celui-ci est caractérisé par son spectre. Présentons le spectre de quelques sources lumineuses... mais pour cela, quelques définitions s'imposent.

##### -b- Définition

On appelle éclairement (noté  $E$ ) la puissance lumineuse moyenne reçue par unité de surface sur une surface placée perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde. L'éclairement se mesure en  $W.m^{-2}$ . Si une onde lumineuse est sinusoïdale, on montre que l'éclairement est proportionnel au carré de l'amplitude  $A$  de l'onde :  $E = k.A^2$ , où  $k$  est une constante que l'on ne précise pas en général. L'éclairement est la grandeur associée à l'onde lumineuse que l'on est capable de mesurer.

Les ondes lumineuses réelles sont des superpositions d'ondes sinusoïdales. Dans le cas d'un spectre continu, l'éclairement est donné par :

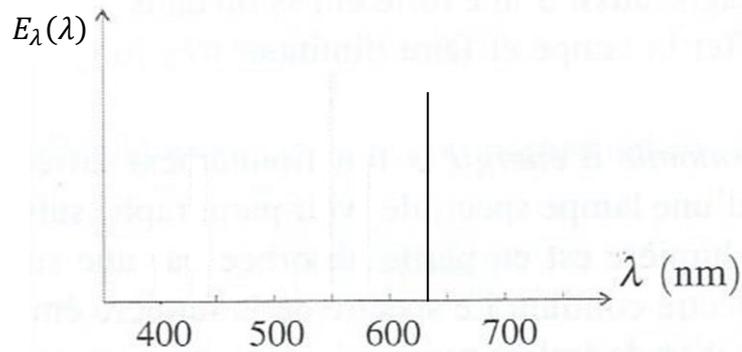
$$E = \int_0^{\infty} E_{\lambda}(\lambda).d\lambda$$

où  $E_{\lambda}(\lambda)$  est l'éclairement spectral.

L'éclairement spectral  $E_{\lambda}(\lambda)$  donne la répartition de l'énergie lumineuse en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$ . On appelle spectre d'une source lumineuse, l'allure de la fonction  $E_{\lambda}(\lambda)$  en fonction de  $\lambda$ .

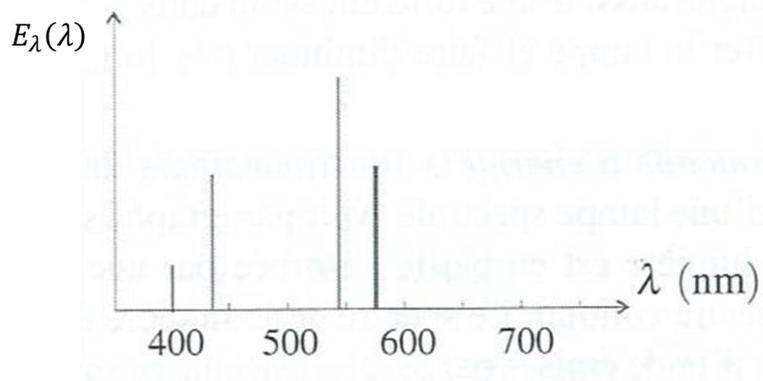
## -c- Spectres de sources lumineuses

- Spectre d'un laser hélium-néon :



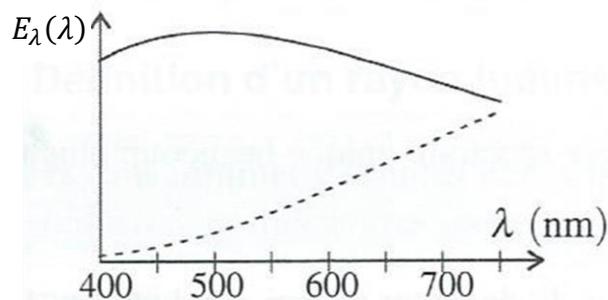
Le laser hélium-néon est « monochromatique ». La longueur d'onde du rayonnement émis est  $\lambda = 632 \text{ nm}$ .

- Spectre d'une lampe spectrale (au mercure basse pression) :



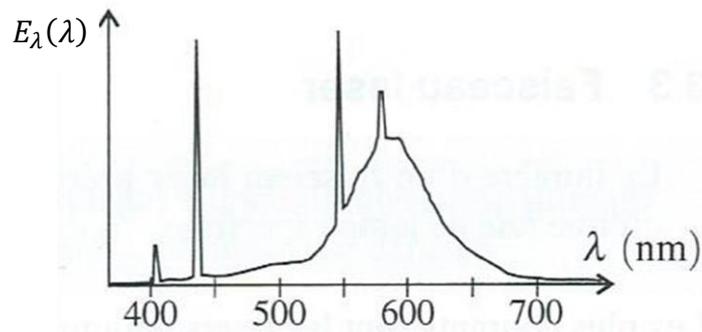
Le spectre d'une « lampe spectrale » (lampe à vapeur de Mercure ou Mercure Cadmium) est discret. On peut noter que le rayonnement est polychromatique.

- Spectres de la lumière solaire (trait plein) et de la lumière d'une lampe à filament (pointillés) :



Contrairement aux spectres d'un laser ou d'une lampe spectrale, le spectre de la lumière solaire ou d'une lampe à filament est continu.

- Spectre d'une lampe "à économie d'énergie" :



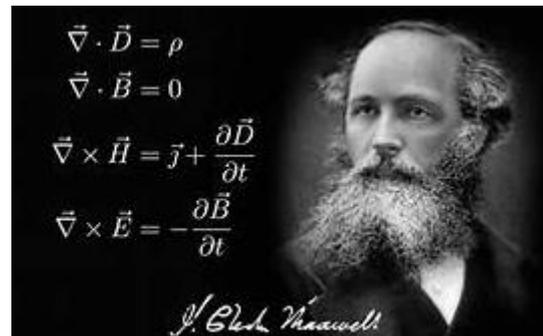
### 3) Notion de paquet d'onde

Par application du théorème de Fourier (intégrale de Fourier pour les spectres continus), le rayonnement émis par une source lumineuse est « la somme » de rayonnements monochromatiques sinusoïdaux. Ceci constitue un « paquet d'onde »... Ce paquet d'onde est caractérisé par son spectre.

## II : Notion d'onde électromagnétique (O.E.M.)

### 1) Eléments historiques

Au XIX<sup>ème</sup> s, la communauté scientifique est partagée concernant la nature de la lumière... D'un côté, il y a les newtoniens (plus newtoniens que Newton lui-même...) qui considèrent que la lumière est corpusculaire et de l'autre, les adeptes d'une approche ondulatoire (C. Huygens, T. Young, A. Fresnel...). A partir de 1871, grâce aux travaux de J.C. Maxwell (qui seront confirmés par les expériences de H. Hertz en 1886), la lumière est décrite comme une onde électromagnétique... L'étude de ces ondes est au programme de seconde année. Pour nous initier à ce concept, nous allons présenter le modèle de l'onde plane progressive monochromatique (O.P.P.M.).



### 2) Onde plane progressive monochromatique (O.P.P.M.)

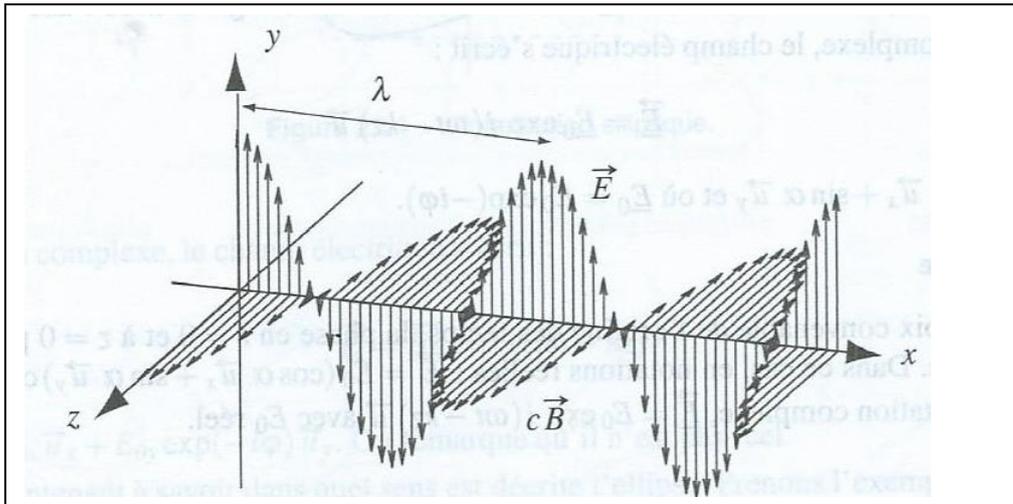
La propagation d'une onde plane progressive monochromatique résulte du « couplage entre un champ électrique  $\vec{E}(M, t)$  et un champ magnétique  $\vec{B}(M, t)$  ». Considérons une onde plane progressive monochromatique se propageant dans la direction du vecteur unitaire  $\vec{u}_x$ . On note  $\vec{k}$  son vecteur d'onde orienté dans la direction de propagation de l'onde et défini par :

$$\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{u}_x$$

avec  $k = \|\vec{k}\| = \frac{2\pi}{\lambda}$

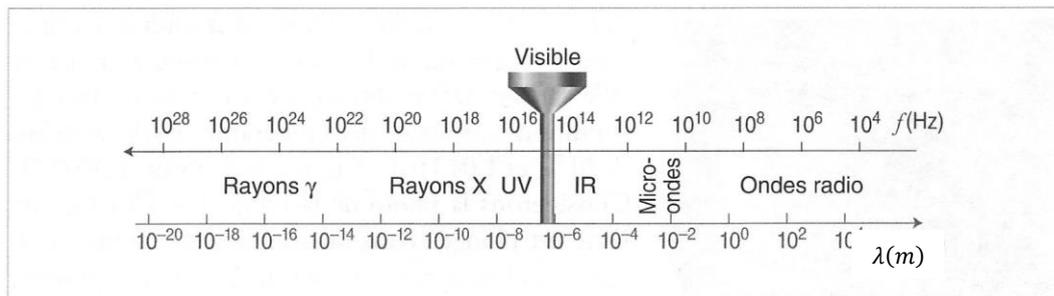
Les champs  $\vec{E}(M, t)$  et  $\vec{B}(M, t)$  sont orthogonaux entre eux, ainsi qu'à la direction de propagation de l'onde (c.à.d au vecteur  $\vec{k}$ ) : l'O.P.P.M. est **une onde transversale**. On montre que le trièdre  $(\vec{k}, \vec{E}, \vec{B})$  est directe.

A un instant  $t$  donné, si on pouvait « photographier » une onde plane progressive monochromatique, elle aurait l'allure suivante :



Sur ce schéma,  $\lambda$  est la longueur d'onde de l'O.P.P.M. La longueur d'onde  $\lambda$  correspond à la période spatiale du phénomène ondulatoire.

**Ordre de grandeur :**



Fréquences et longueurs d'onde dans le vide des ondes électromagnétiques.

Dans le vide, nous retiendrons que :

$$400 \text{ nm} < \lambda < 750 \text{ nm}$$

### 3) Célérité de la lumière

#### -a- Eléments historiques

Dès l'Antiquité, les philosophes s'interrogent sur la nature de la lumière. Est-elle corpusculaire ou ondulatoire ? Se propage-t-elle dans le vide ou dans un fluide éthéré ? Est-elle instantanée ou progressive ?

Dans le Discorsi (1638), Galilée propose une méthode permettant de mesurer la vitesse de la lumière. « Deux individus se munissent chacun d'une lanterne dont le feu est occulté par un écran amovible. Le premier soulève l'écran de sa lanterne. Dès que le second perçoit le feu de la première lanterne, il soulève l'écran de la sienne. Le premier "mesure" le temps qui sépare son action de l'observation du feu de son compagnon. Une fois que ce temps est estimé, les deux individus reprennent la même expérience à grande distance, ce qui permet de mesurer la vitesse de la lumière.... ».

Le père de la physique expérimentale a-t-il réalisé cette expérience ? C'est peu probable.... Toujours est-il que s'il l'a réalisée, cette expérience ne permet pas de mesurer la vitesse de la lumière ! En effet, si les deux individus sont séparés d'une distance de 5,0 km, la lumière met 30  $\mu\text{s}$  pour à parcourir deux

fois cette distance. L'idée est intéressante, mais les distances sont insuffisantes. Il faut des distances importantes, beaucoup plus importantes... :

Il faut des distances astronomiques pour mesurer la vitesse de la lumière dans le vide !

A la même époque, René Descartes propose une expérience similaire à celle de Galilée qui mettrait en jeu de grandes distances... des distances astronomiques ! Il propose de profiter d'une éclipse de Lune pour mesurer la vitesse de la lumière. En effet, si la lumière met un temps  $t_0$  pour aller de la Terre à la Lune, elle met un temps  $2 \cdot t_0$  pour être observée sur la Terre par réflexion. Pendant ce temps, la Terre a tourné autour du Soleil et la Lune est observable sous un angle  $\alpha_0$  depuis la surface de la Terre. Si on peut mesurer  $\alpha_0$  on peut déterminer  $t_0$ . Connaissant la distance Terre-Lune, il est possible de déterminer la vitesse de la lumière... Le principe est ingénieux mais à l'époque on ne sait pas mesurer  $\alpha_0$  sur des intervalles de temps inférieur à 10 s (et il faut 2,6 secondes à la lumière pour faire un aller-retour de la Terre à la Lune). Descartes en conclura que la vitesse de la lumière est instantanée.

Il faut attendre 1676 pour que le scientifique danois Olaüs Römer mesure enfin la vitesse de la lumière dans le vide. Alors qu'il observait les satellites de Jupiter (découverts par Galilée en 1610), il constata que le satellite Io (satellite le plus proche de la planète, qui possède une période voisine de 42 heures) n'est pas régulier ! Sa période fluctue de 16 (à 22) minutes selon la position relative de la Terre par rapport à Jupiter ce qui est contraire aux lois de Kepler. Faisant confiance aux lois de Kepler, Olaüs Römer émis l'hypothèse que ces fluctuations étaient dues au temps de propagation de la lumière du satellite jusqu'à la Terre. Connaissant les dimensions du système solaire (grâce aux mesures réalisées par Picard à l'Observatoire de Paris et Jean Richer à Cayenne en 1672), cette observation permit à Olaüs Römer d'avoir une estimation de la vitesse de la lumière dans le vide :  $c = 215.000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . Cette mesure n'est pas très précise... mais elle donne un terme à la polémique relative à la vitesse de la lumière : la lumière n'est pas instantanée. Elle est progressive. Par la suite, de nombreuses expériences (Cornu en 1874 et 1876, Young et Forbes en 1882, Perrotin en 1902...) permirent de mesurer la vitesse de la lumière dans le vide avec davantage de précision.

Nous retiendrons que dans le vide, la vitesse de la lumière est  $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

-b- Indice optique d'un milieu

L'expérience montre que la vitesse de la lumière est maximale dans le vide. On note  $v$  la vitesse de la lumière dans un milieu transparent. L'indice optique du milieu noté  $n$  est défini par :

$$n = \frac{c}{v}$$

avec  $c$  célérité de la lumière dans le vide et  $v$  vitesse de la lumière dans le milieu transparent.

Par définition, l'indice optique est sans dimension, donc sans unité. Dans le vide  $v = c$  donc l'indice optique du vide est égal à 1. Avec  $v \leq c$  nous retiendrons que  $n \geq 1$ .

**Ordres de grandeur :**

- Indice de l'air :  $n = 1,0003$ . Donc la lumière se propage presque aussi vite dans l'air que dans le vide. Avec 3 C.S., nous assimilerons l'indice de l'air à celui du vide :  $n = 1,00$ .
- Indice optique de l'eau :  $n = 1,33$
- Indice optique du verre :  $n = 1,50$ . Cependant, ceci dépend du type de verre :  $n = 1,52$  pour le crown et  $n = 1,68$  pour le flint appelé aussi « le cristal des anglais ».
- Indice optique d'un diamant :  $n = 2,42$ .

**-c- Milieu dispersif**

Beaucoup de milieux transparents sont sensibles à la fréquence de l'onde lumineuse. L'indice optique du milieu dépend alors de la longueur d'onde du rayonnement lumineux  $n(\lambda)$ . On dit que ces milieux sont dispersifs (parce qu'ils « dispersent », ils « décomposent » la lumière. Exemples : gouttes d'eau dans un arc en ciel, prisme de Newton...). La formule semi-empirique de Cauchy donne l'expression de l'indice optique du milieu en fonction de la longueur d'onde dans un milieu dispersif :

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

où  $A$  et  $B$  sont des constantes caractéristiques du milieu.

**4) Grandeurs ondulatoires**

Dans le vide, la fréquence d'une onde électromagnétique, notée  $\nu$  (lire « nu ») est donnée par :

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

**Ordres de grandeur :** dans le domaine du visible, dans le vide, la fréquence d'une onde électromagnétique est de l'ordre de  $6 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ .

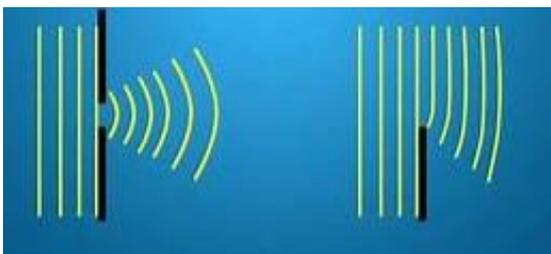
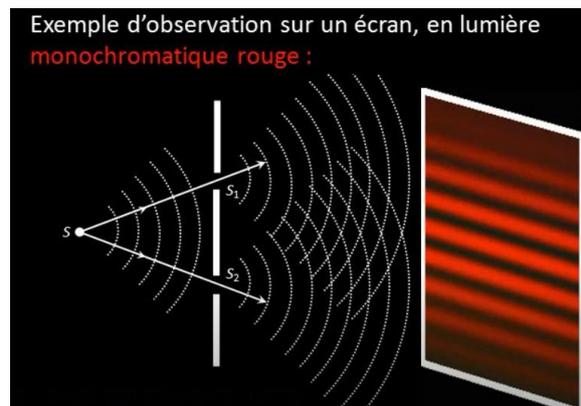
Longueur d'onde : $\lambda$	400 nm (bleu)	750 nm (rouge)
Fréquence : $\nu$	$7,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$	$4,0 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$

Sachant que la période  $T$  est l'inverse de la fréquence, on vérifie que dans le vide :

$$\lambda = c \cdot T$$

**5) Phénomènes ondulatoires**

La lumière est une onde électromagnétique... on peut donc observer des phénomènes lumineux de nature ondulatoire : diffraction, interférences ou phénomènes de battement.

**Diffraction** par une fente et par un obstacle**Interférences** (dispositif de type trous de Young)

### III : Dualité onde-corpuscule

#### 1) Relation de Planck-Einstein

La lumière n'est pas seulement ondulatoire, elle est également corpusculaire. La formule de Planck-Einstein énoncée en 1906 postule que l'énergie d'un photon de fréquence  $\nu$  est donnée par :

$$E = h \cdot \nu$$

où  $h$  est la constante de Planck. Dans les unités du système international  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ .

Cette relation postule la dualité onde-corpuscule pour la lumière puisque l'énergie d'un photon est proportionnelle à sa fréquence. Dans le vide :

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

#### 2) Longueur d'onde dans un milieu transparent

Considérons un photon subissant une réfraction du vide dans un milieu transparent d'indice  $n$ . En faisant l'hypothèse que le photon est intégralement transmis, son énergie et sa fréquence sont constantes. On note  $v$  la vitesse du photon dans le milieu transparent et  $\lambda'$  sa longueur d'onde :

- Dans le vide :  $E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$
- Dans le milieu transparent :  $E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot v}{\lambda'}$

Sachant que dans le milieu transparent  $v = \frac{c}{n}$  :

$$\frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{h \cdot c}{n \cdot \lambda'}$$

On en déduit que dans le milieu transparent, la longueur d'onde est plus courte :

$$\lambda' = \frac{\lambda}{n}$$

### IV : Domaine de l'optique géométrique

L'optique géométrique est une approximation de l'optique ondulatoire satisfaisante tant que les propriétés du milieu varient peu devant la longueur d'onde  $\lambda$  de la lumière. Soit  $a$  une distance caractéristique du milieu, l'optique géométrique est satisfaisante si :

$$a \gg \lambda$$

**Ordres de grandeur :** à notre échelle, la distance caractéristique est le mètre, soit  $a \sim 1 \text{ m}$ . Avec  $\lambda(\text{nm}) \in [400; 750]$  on vérifie que  $a \gg \lambda$ . L'optique géométrique permet donc de décrire les phénomènes optiques accessibles à notre échelle (lunette de vision, loupe, lunette astronomique, télescope, microscope...). Pour observer des phénomènes ondulatoires, il faut des distances plus faibles : coloration lumineuse à la surface d'une nappe d'huile (cf anneaux de Newton), effet d'une plume d'oiseau sur la lumière...

L'optique géométrique a pour objet l'étude de la propagation de la lumière dans les milieux transparents et la formation des images à partir du concept de rayon lumineux.