

# Chapitre 1- Notions fondamentales sur la lumière

## I- Bref historique

L'optique est l'étude de la lumière, c'est à dire des ondes électromagnétiques dans la gamme de fréquences  $3,8 \cdot 10^{14} - 7,7 \cdot 10^{14}$  Hz (en longueurs d'onde dans le vide : 780–390 nm). L'optique géométrique est une description de la propagation de la lumière en terme de lois géométriques qui s'appuient sur la notion de rayons lumineux (propagation rectiligne dans un milieu homogène, lois de Snell-Descartes au changement de milieu, faisceaux lumineux, surfaces d'onde,...).

L'étude des phénomènes lumineux remonte à l'antiquité. Euclide : introduit la notion de rayons lumineux bien qu'il pense que ceux-ci seraient émis par l'oeil. Ptolémée établit les lois de la réflexion et ébauche les lois de la réfraction. Cependant, il a fallu attendre le XI<sup>ème</sup> siècle pour qu'un scientifique arabe, Alhazen montre que la lumière n'est pas issue de l'oeil mais qu'il existe des sources de lumière. En Europe, il faut attendre la fin du XVI<sup>ème</sup> siècle avec Galilée (1600) qui construit les premières lunettes et les premiers microscopes. Descartes et Snell posent (1620) les lois régissant les phénomènes de réflexion et réfraction (déjà pratiquement établies par Kepler aux alentours de 1600), mais c'est le mathématicien Fermat qui propose le principe du moindre temps permettant de démontrer ces relations.

Huygens à la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle, suggère une théorie ondulatoire de la lumière, confirmée par les travaux de Fresnel au XIX<sup>ème</sup> siècle sur les interférences et la diffraction (le phénomène de diffraction était connu depuis les travaux de Grimaldi aux alentours de 1650). A la fin du XVII<sup>ème</sup> et début XVIII<sup>ème</sup> siècles, Newton énonce une théorie corpusculaire de la lumière, qui n'est pourtant étayée par aucune de ses expériences sur la lumière. Cette théorie prévaudra pendant un siècle compte tenu de sa notoriété. La théorie ondulatoire va revenir au XIX<sup>ème</sup> siècle avec Fresnel, Euler Bernoulli, Lagrange, Hamilton, ...C'est Maxwell et Faraday qui montrent à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle que la lumière est une onde électromagnétique se propageant dans le vide à la vitesse  $c$ .

En 1887, Hertz découvre l'effet photoélectrique. Cet effet ne peut s'expliquer par la théorie électromagnétique et est interprété par Einstein en 1905. La lumière est alors décrite comme formée de particules 'photons' interagissant individuellement avec les électrons des atomes.

C'est de Broglie en 1924 qui concilie les deux approches en proposant la dualité entre les deux aspects de la lumière, onde et particule.

Entre 1945 et 1950 Feynman développent la théorie de l'électrodynamique quantique qui permet une interprétation cohérente des phénomènes ondulatoires et corpusculaires.

## II- Théorie ondulatoire

La lumière est caractérisée par la dualité onde/corpuscule. C'est une onde électromagnétique mise en évidence par les expériences de diffraction. Elle présente aussi une nature corpusculaire mise en évidence par les expériences sur l'effet photoélectrique et les photons (prix Nobel de physique Einstein). Elle transporte une énergie quantifiable (photons).

### 1. Notion d'onde

Une onde est une perturbation qui se propage sans transport de matière dans un milieu donné (ou dans le vide pour les ondes électromagnétiques). Il y a transfert d'énergie sans transport de matière. Ex : rides à la surface de l'eau, ondulations d'un champ de blé, cordes vibrantes, son.

Les ondes élastiques (rides, cordes vibrantes, son) se propagent à l'intérieur ou à la surface d'un matériau, ayant des propriétés élastiques : l'eau, la corde, l'air.

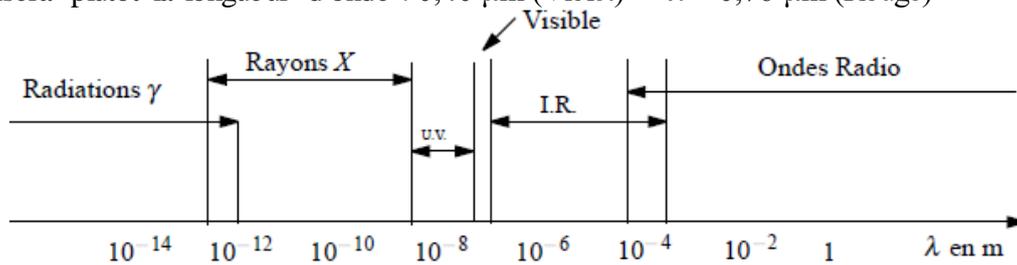
Les ondes électromagnétiques (OEM) (lumière, signaux TV, ondes radio) peuvent se propager dans le vide.

**2. Caractéristiques des ondes périodiques :** Les ondes à la surface de l'eau, les ondulations d'une corde ont un caractère périodique. Elles se reproduisent identiques à elles-mêmes au bout d'un temps  $T$  appelé période de l'onde (exprimée en s). On définit la fréquence  $\nu = \frac{1}{T}$  (Hertz, Hz), la vitesse de propagation  $v$  ou  $c$  (célérité) en m.s<sup>-1</sup> et la longueur d'onde  $\lambda = vT$  (en mètre).

**3. Ondes électromagnétiques** Une onde électromagnétique est constituée d'un champ électrique  $\vec{E}$  et d'un champ magnétique  $\vec{B}$  perpendiculaires à la direction de propagation qui varient périodiquement et se propagent

a) dans le vide à la vitesse  $c = 3 \cdot 10^8$  m.s<sup>-1</sup>

Le domaine des fréquences est très large : 100 MHz (Mega Hertz) =  $100 \cdot 10^6$  Hz pour les ondes radio,  $10^{10}$  Hz pour les micro-ondes,  $10^{16}$  les UV,  $10^{19}$  les rayons X et de  $10^{20}$  à  $10^{24}$  pour les rayons  $\gamma$ . Le visible ne représente qu'une partie très faible du spectre ( $\nu \approx 10^{15}$  Hz). On utilisera plutôt la longueur d'onde :  $0,40 \mu\text{m}$  (Violet)  $< \lambda < 0,76 \mu\text{m}$  (Rouge)



Spectre des ondes électromagnétiques.

b) Dans un milieu matériel : à la vitesse  $v=c/n$  où  $n$  est l'indice de réfraction du milieu

On aura alors  $\lambda = vT = c \frac{T}{n} = \frac{\lambda_0}{n}$  où  $\lambda_0$  est la longueur d'onde dans le vide.

**Dispersion et absorption** : Dans un milieu matériel, l'indice de réfraction  $n$  dépend de la longueur d'onde :  $n = A + \frac{B}{\lambda^2}$  où  $A$  et  $B$  sont des constantes (relation de Cauchy). La vitesse

de la lumière visible dans un milieu est donc plus importante dans le rouge que dans le bleu. Ceci explique les phénomènes de dispersion de la lumière par un prisme (spectroscopes) ou par une goutte d'eau (arc en ciel).

Lorsqu'une onde lumineuse se propage dans un milieu matériel, son intensité décroît souvent très rapidement (sauf dans le cas de milieux transparents). C'est le phénomène d'absorption.

### III - Aspect corpusculaire

La théorie ondulatoire décrit le passage de la lumière à travers les diverses substances. Elle explique les phénomènes de réfraction, réflexion, diffraction et interférences mais elle échoue pour l'interprétation des phénomènes d'émission et d'absorption. Il faut alors faire appel à la théorie corpusculaire en associant à une onde électromagnétique de fréquence  $\nu$  une particule sans masse appelée photon d'énergie  $E = h\nu$  où  $h$  est la constante de Planck ( $h = 6.6 \cdot 10^{-34}$  J.s). De même à toute particule d'énergie  $E$  (électron par exemple) on peut associer une onde de fréquence  $\nu$  telle que  $E = h\nu$ . Ceci permet, par exemple, d'expliquer les phénomènes de diffraction des électrons par la matière.

## IV. Les sources de lumière.

### a) Sources primaires et secondaires :

- Les sources primaires émettent spontanément de la lumière sans avoir besoin d'être éclairées : le feu, une bougie, une lampe, le soleil ...
- Les sources secondaires n'émettent pas spontanément la lumière. Elles doivent être éclairées pour être visibles : une feuille de papier, la lune n'est visible que si elle est éclairée par le soleil.

Dans le domaine courant de l'optique géométrique on utilisera souvent le terme *source* pour désigner une source primaire et *objet* pour une source secondaire.

### b) Sources ponctuelles et étendues

- Une source **ponctuelle** est une source qui peut être assimilée à un point.  
A *distance finie* : pixel d'un écran de télévision, écran percé par un petit trou placé devant une lampe, point d'une feuille de papier.  
A *l'infini* : une étoile, éventuellement une lampe éloignée.
- Une source **étendue** a une dimension non négligeable, elle peut être considérée comme formée d'une infinité de sources ponctuelles indépendantes les unes des autres.  
A *distance finie* : une lampe, un écran de télévision...  
A *l'infini* : les étoiles et le soleil (primaires), la lune (secondaire, elle doit être éclairée par le soleil pour être visible)

### c) Sources à spectre continu

C'est le cas des lampes à incandescence ou du rayonnement solaire. Dans ce cas la source fournit un spectre continu qui inclut toutes les longueurs d'onde du visible. La puissance rayonnée dépend de la température de la source et de la longueur d'onde. Elle présente un maximum pour une valeur de longueur d'onde  $\lambda_{\max}$ . Cette longueur d'onde est reliée à la température de la source par la loi de Wien :

$$\lambda_{\max} = \frac{K}{T}, \text{ où } K \text{ est la constante de Wien, } K = 2.0 \times 10^{-3} \text{ m.Kelvin}$$

Pour une lampe à filament de tungstène,  $T \approx 4000\text{K}$  ;  $\lambda_{\max} = 0,72 \mu\text{m}$  (dans le visible)

Pour le soleil  $T = 6000\text{K}$  ;  $\lambda_{\max} = 0,5 \mu\text{m}$

### d) Sources à spectre de raie

C'est le cas des lampes à vapeur atomique (hydrogène, sodium, mercure). On va observer dans ce cas les radiations correspondant aux transitions entre les niveaux d'énergie ( $E_n$ ) électroniques discontinus de ces atomes, suivant la relation  $\Delta E = E_i - E_f = h\nu$ , où  $i$  et  $f$  font référence aux états électroniques initial et final respectivement.

Dans le cas des molécules, la répartition des niveaux d'énergie est plus complexe et on observe dans le visible des spectres de bande correspondant aux transitions entre les niveaux électroniques qui se subdivisent en sous niveaux.

## 3. Le laser

**Laser** : abbreviation anglaise de "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation"

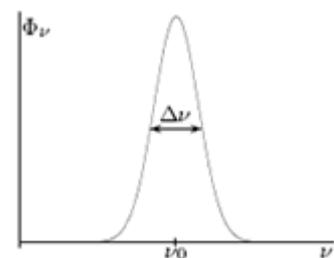
Les lasers les plus utilisés actuellement sont :

– Lasers à gaz : le laser hélium-néon, le laser au gaz carbonique, le laser à argon, le laser à azote ;

– Lasers à liquide : le laser à colorants ;

– Lasers à solide : le laser au néodyme, le laser à rubis, le laser à semi-conducteurs (diode laser).

**Propriétés du faisceau laser**



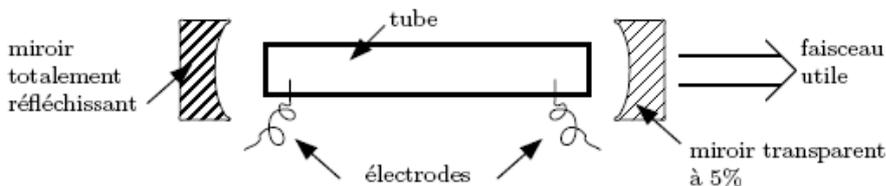
Spectre d'un laser.

Le laser permet d'obtenir un faisceau de lumière cohérente, très intense, quasi-monochromatique et très directive :

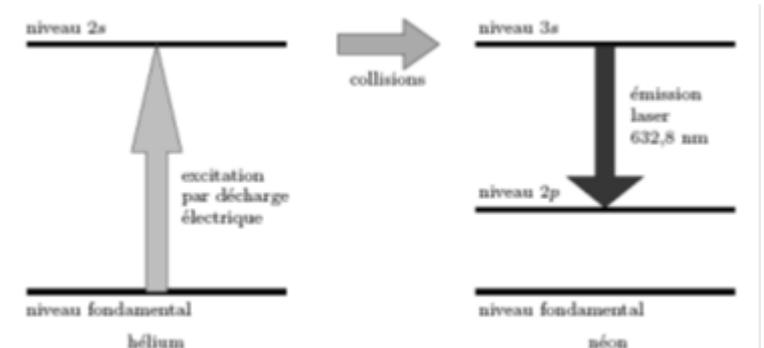
- lumière cohérente
- très intense : il y a risque lorsqu'on reçoit un faisceau laser directement dans les yeux ;
- quasi-monochromatique : la largeur  $\Delta\nu$  de la raie laser (voir figure) est de l'ordre du MHz dans le visible ( $\Delta\nu/\nu_0 = 10^{-8}$ ) ;
- très directive : la divergence d'un faisceau laser est de l'ordre de  $10^{-5}$  radiant.

### Le laser He-Ne

Le laser He-Ne émet une radiation visible rouge, de longueur d'onde  $\lambda = 632,8$  nm. C'est un laser à gaz composé d'une cavité remplie d'environ 85% d'hélium et de 15% de néon (figure). Cette cavité est constituée d'un tube cylindrique en verre placé entre deux lames métallisées concaves dont l'une, réfléchissante à 95% seulement, permet au faisceau de sortir. Le gaz contenu dans ce tube peut être excité par des électrodes.



Le milieu actif est constitué par les atomes de néon mais c'est l'hélium qui joue un rôle essentiel dans le pompage aboutissant à l'inversion de population. Les atomes d'hélium sont excités par une décharge électrique. Ils sont portés dans un niveau 2s qui a pratiquement la même énergie que le niveau 3s du néon. Les atomes d'hélium excités transmettent leur énergie aux atomes de néon par collisions. Les atomes de néon retombent ensuite vers des états d'énergie inférieurs en émettant un rayonnement laser.



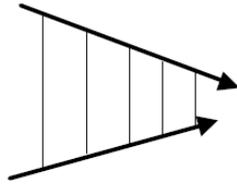
## 4. Principe de Fermat

a) **Énoncé** : Pour aller d'un point à un autre la lumière suit, parmi tous les trajets possibles, celui dont le temps de parcours est extrémal.

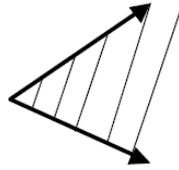
**Forme plus générale** : On définit le chemin optique  $L_{AB}$  de A à B :  $L_{AB} = \int_A^B n(s)ds$  ; où ds est un élément de distance appartenant au chemin AB parcouru pendant le temps  $dt$  par la lumière. L'indice du milieu,  $n(s)$ , peut varier le long du parcours. Le trajet suivi par la lumière est celui correspondant au chemin optique extrémal.

### b) Conséquences

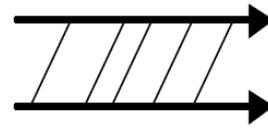
**-Principe de propagation rectiligne de la lumière.** Dans un milieu homogène ( $n = C^{te}$ ) la lumière se propage en ligne droite. Le trajet suivi par la lumière constitue un **rayon lumineux** ; (ex : rayon laser). Un faisceau lumineux est limité par deux rayons lumineux (les autres rayons se trouvant entre les deux). Un faisceau peut être divergent, convergent ou parallèle. Une source à grande distance (soleil, lampadaire dans la rue) donnera un faisceau cylindrique de rayons parallèles.



Faisceau convergent



divergent



Parallèle

- **Lois de Snell Descartes** (Chapitre suivant)

- **Principe de retour inverse de la lumière** : Lorsque l'on inverse le sens de propagation de la lumière, un rayon lumineux suit le même chemin.

## 5. Validité de l'optique géométrique

Il existe plusieurs domaines de l'optique, la nature des phénomènes étudiés justifiera l'utilisation de l'un des domaines. *L'optique géométrique est une théorie qui n'est valable qu'en première approximation lorsque les dimensions des systèmes optiques sont grandes par rapport à la longueur d'onde des rayonnements considérés.* Dans le visible  $\lambda \approx 0,5 \mu\text{m} \ll$  dimensions des systèmes optiques. Les phénomènes de réflexion, réfraction et dispersion entrent dans le cadre de cette théorie et pourront être décrits à l'aide de paramètres géométriques.