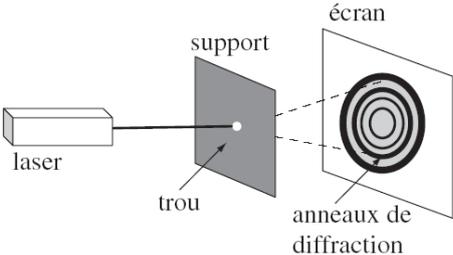


O5. Nature de la lumière

A- Nature ondulatoire ou corpusculaire ?

1. Caractère ondulatoire de la lumière : la diffraction

Diffraction des vagues à la surface de l'eau	Diffraction de la lumière	Diffraction du son
 <p>Des vagues arrivent parallèlement sur une ouverture</p>		<p>Un son qui se propage par une porte entrebâillée</p>

Dans ces expériences, au-delà de l'obstacle, l'onde se propage comme si elle était émise au niveau de cet obstacle. Ce phénomène peut s'expliquer si ce sont des ondes qui se propagent :

- Des ondes mécaniques (son, vaguelettes...),
- Des ondes électromagnétiques (lumière...),

La lumière a donc une nature ondulatoire, comme l'avait établi Huygens au XVII^{ème} siècle.

2. Grandeurs caractéristiques de l'onde lumineuse

L'onde lumineuse est une onde électromagnétique progressive sinusoïdale et périodique. On peut distinguer :

Une périodicité temporelle :

Chaque « couleur » de la lumière « vibre » avec une périodicité T (en secondes). On peut définir alors la fréquence f :

$$f = \frac{1}{T}$$

Une périodicité spatiale :

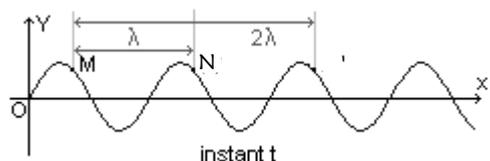
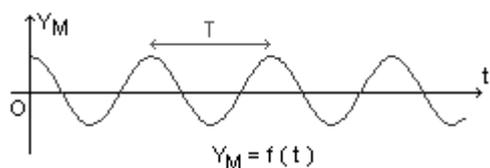
Le point M « vibre » en phase avec un point voisin immédiat N : on a alors : $MN = \lambda$

Ces 2 grandeurs sont reliées à la célérité (vitesse) notée c de propagation de l'onde par la formule :

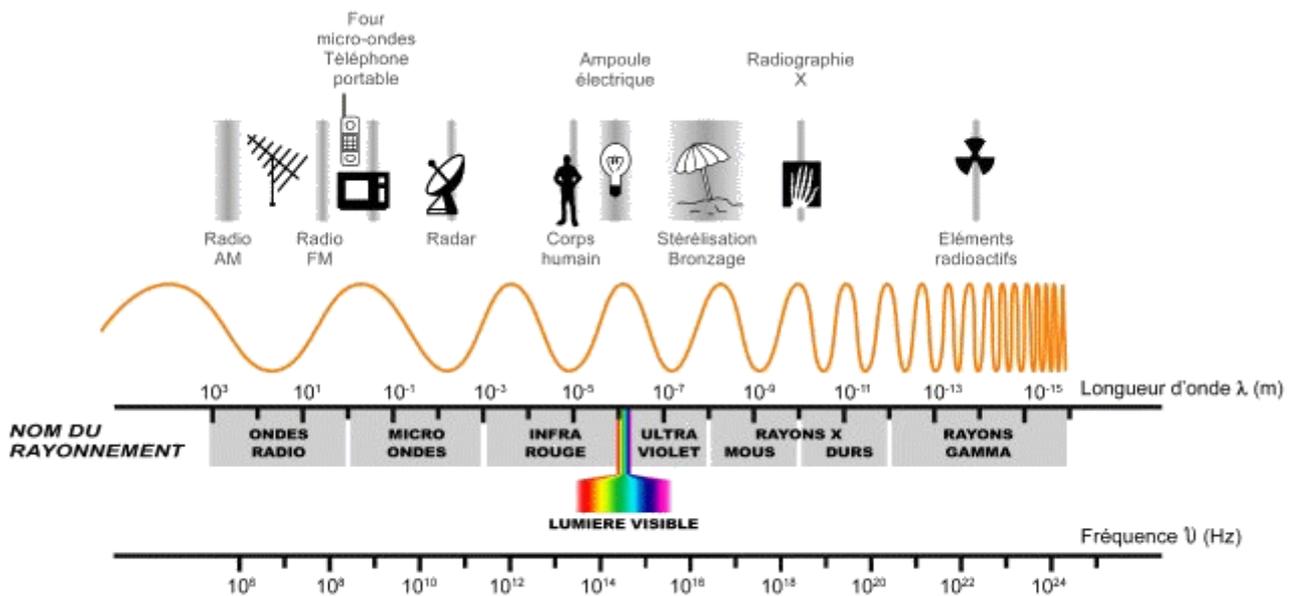
$$\lambda = c.T$$

Avec

$$c = 3,00.10^8 \text{ m.s}^{-1}$$



Domaine des ondes électromagnétiques :



Dans un milieu quelconque, d'indice de réfraction n , la célérité de l'onde diminue :

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

$$(n \geq 1 \text{ donc } v \leq c)$$

Comme la fréquence (« couleur ») ne dépend pas du milieu, c'est la longueur d'onde qui dépend du milieu traversé :

$$\lambda = v \times T = \frac{c}{n} \cdot T = \frac{\lambda_0}{n}$$

3. Aspect corpusculaire de la lumière

La théorie corpusculaire, qui considère la lumière comme une particule en mouvement, fut initialement proposée par Newton (au XVII^{ème} siècle). Mais cette théorie fut abandonnée, car elle ne permettait pas d'expliquer notamment les expériences de diffraction.

Cependant, certaines expériences ultérieures ne pouvaient s'expliquer que si la lumière est constituée de grains d'énergie. Ainsi, dans l'effet photoélectrique, certains matériaux ne peuvent éjecter des électrons que s'ils sont éclairés par une lumière de fréquence suffisante, quelle que soit l'intensité lumineuse.

En 1905, Einstein réconcilia ces deux théories : il parle alors de dualité onde-corpuscule, et il existe une relation entre l'énergie du corpuscule (photon) et la fréquence f :

$$E = h \cdot f$$

Où

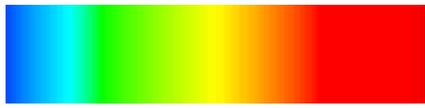
h : constante de Planck ; $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

B- Sources de lumière

1. Spectres de lumière

Un spectre est le résultat de la décomposition de la lumière en fonction de la fréquence (ou de la longueur d'onde). On utilise alors un élément dispersif (prisme dont l'indice de réfraction n dépend de la longueur d'onde, un réseau...).

On distingue différents spectres :

		
Spectre continu d'une lampe à incandescence (en chauffant, le filament émet une lumière de plus en plus en radiations de fréquence élevée)	Spectre monochromatique du laser (une seule raie)	Spectre de raies d'une lampe à décharges (comme le tube fluorescent) (chaque gaz est responsable d'un certain nombre de raies qui lui sont caractéristiques)

2. Répartition des électrons dans les atomes

Dans un atome (ou une molécule), les électrons sont répartis sur des couches (K, L, M...), des sous-couches (s, p, d, f...), chacune correspondant à un niveau d'énergie particulier : on dit que ces niveaux d'énergie sont quantifiés.

Lorsque ces électrons sont répartis sur les différents niveaux d'énergie les plus bas, on dit que l'atome est dans son état fondamental. Sinon, on dit qu'il est dans un état excité.

Chaque atome (ou molécule) a des niveaux d'énergie qui lui sont spécifiques. Il ne peut y avoir 2 électrons dans le même état d'énergie.

3. Interaction entre la lumière et un atome

Emission de lumière :

Si un électron se trouve dans un état d'énergie $E_p > E_n$ alors que le niveau E_n est libre, on dit que l'atome est excité (par exemple sous l'effet d'une décharge).

En se désexcitant, il passe sur le niveau E_n en libérant l'énergie :

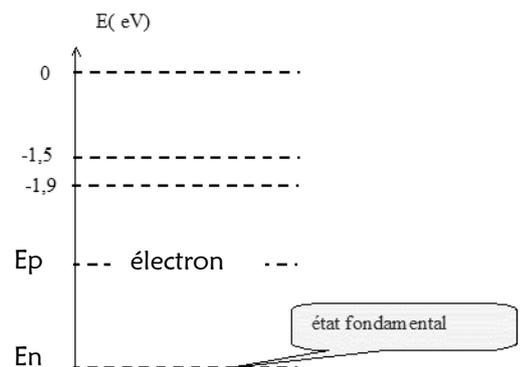
$$E = E_p - E_n = h.f$$

Cette énergie est émise sous forme d'un photon.

La lumière émise a donc une fréquence (« couleur ») particulière qui dépend des niveaux d'énergie E_n et E_p , et donc de l'atome associé.

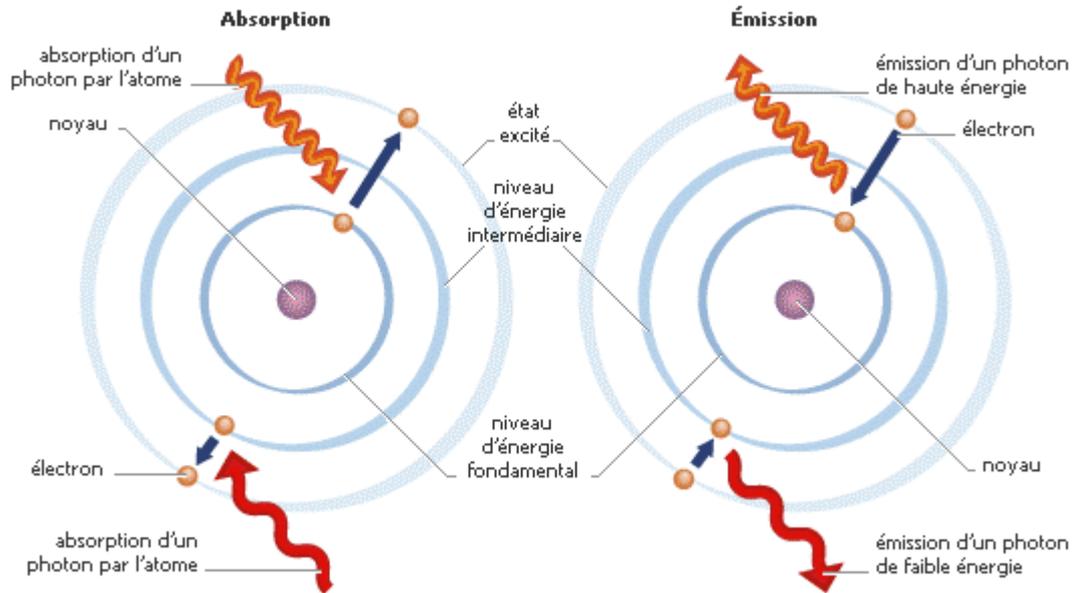
Plusieurs transitions sont ainsi possibles : elles caractérisent le spectre d'émission spécifique d'un atome donné.

Remarque : Dans le cas du laser, une seule transition d'énergie n'est concernée par la lumière émise.



Absorption de lumière :

L'atome peut être excité en absorbant un photon si ce dernier a une énergie correspondant à une transition entre 2 niveaux d'énergie de l'atome : on obtient donc un spectre d'absorption complémentaire du spectre d'émission de l'atome.



C- Une source particulière : le LASER

LASER : abréviation de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

1. Propriétés

lumière monochromatique

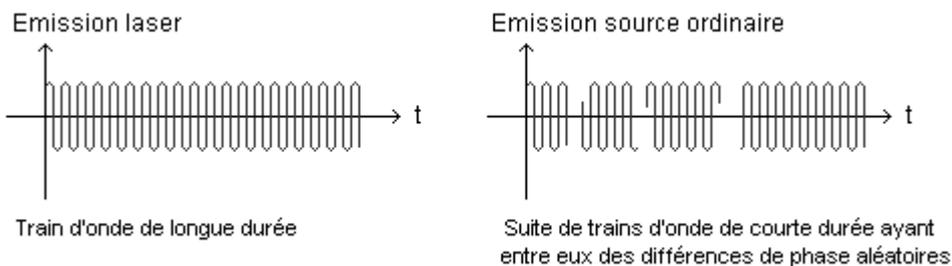
Exemple : le laser à gaz Hélium-Néon a une longueur d'onde : $\lambda_0 = 632,8nm$ (rouge)

Tous les photons émis par le laser ont donc la même énergie.

lumière cohérente

- **Cohérence temporelle** (cohérence longitudinale)

L'onde lumineuse n'est jamais émise de façon continue : cela forme un train d'onde :



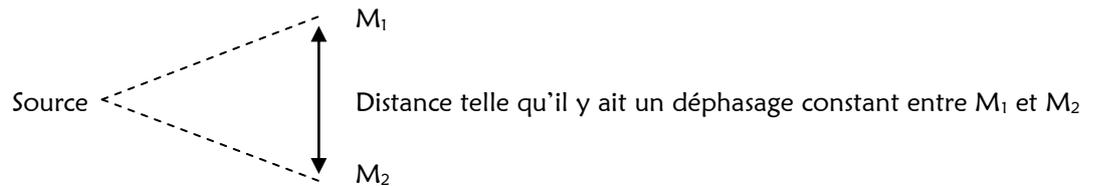
Le laser a une cohérence temporelle bien supérieure à celle des autres sources de lumière.

Exemples :

- pour le laser He-Ne, la durée du train d'onde $t_c = 10^{-9}s$, donc la longueur de cohérence temporelle vaut $l_c = t_c \cdot c = 0,3m$
- pour la lumière blanche, $t_c = 2,5 \cdot 10^{-15}s$ donc : $l_c = 750nm$

- **Cohérence spatiale** (cohérence transversale)

Elle peut être caractérisée par la distance limite entre 2 points éclairés par une même source pour qu'ils interfèrent (cf chapitre suivant).

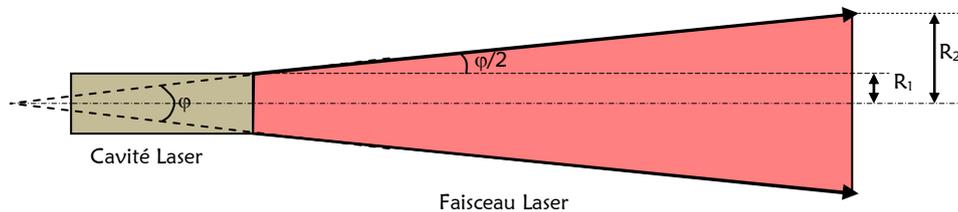


Application : interférométrie, lecture CD / DVD, codes barre, télécommunications laser...

faisceau directif

Le faisceau laser est très peu divergeant : on dit qu'il est très directif.

La directivité est définie par l'angle $\varphi/2$ que fait le faisceau avec son axe.



Pour un laser hélium-néon : $\varphi \approx 1'$.

Exemple : pour un rayon de faisceau à la sortie de l'appareil de 2mm, on trouve à une distance $L = 10$ m, un rayon de faisceau de 3,5 mm

Applications : alignements et visées pour faciliter les constructions (tunnel sous la Manche), télémétrie (mesure de la distance Terre-Lune), spectacles.

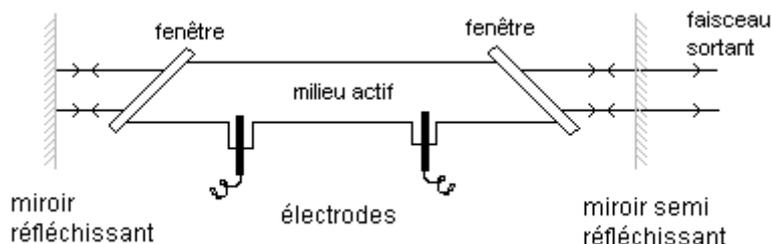
Puissance

La puissance des lasers est très variable. Faible (quelques mW) ou moyenne pour des lasers à fonctionnement continu (excités, par exemple, par une décharge électrique continue : DEC). Elle peut devenir très grande pour des lasers fonctionnant par impulsion (excités par des décharges électriques impulsionnelles : DEI) et atteindre 10^6 W, voire 10^{15} W pendant des durées très brèves (10^{-12} s.).

Applications : fusion des matériaux, chirurgie...

2. Principe de fonctionnement

Constituants

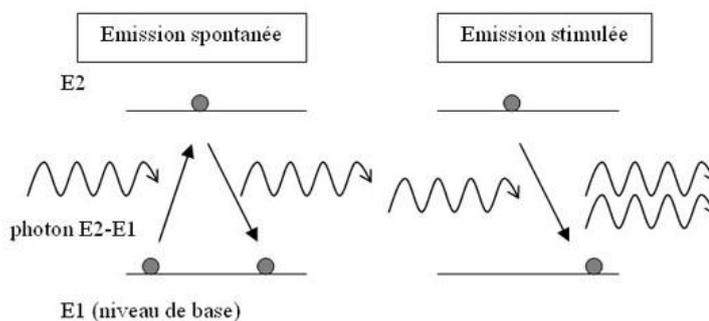


- Une cavité contenant le milieu actif émetteur (atomes, molécules)
- Une source d'énergie dont le rôle est d'exciter le milieu actif : c'est le « pompage optique ». Il peut s'agir de décharges électriques dans un gaz, de flashes lumineux pour un laser à solide...
- 2 miroirs : un réfléchissant et un semi-réfléchissant

Emission stimulée

Contrairement à l'émission spontanée d'un photon par un atome excité, le photon émis est stimulé ici par l'arrivée d'un autre photon.

Celui-ci a alors toutes les mêmes caractéristiques que le photon « stimulateur » (soit même longueur d'onde, même trajectoire et même phase) : il y a donc duplication de la lumière.



Inversion de population

La répétition de cette duplication permet de créer une lumière cohérente (photons tous identiques) : le laser.

Cependant, il y a normalement plus d'atomes non excités qu'excités ; Il faut donc augmenter leur population. Cette inversion de population est obtenue par :

- Pompage optique : transfert d'énergie lumineuse à des atomes
- Décharges électriques
- Ou encore par des réactions chimiques

Résonateur

Deux miroirs précisément orientés réfléchissent plusieurs fois les électrons avant que ceux-ci ne puissent sortir selon une direction privilégiée par le miroir semi-réfléchissant.

La distance précise séparant ces deux miroirs (un multiple d'une demi-longueur d'onde) fait que la cavité se comporte alors comme un résonateur pour une longueur d'onde particulière.

3. Applications

Utilisation	Puissance	Mode de fonctionnement	Remarques générales
Lecture des disques compact <i>Lecture des codes barres dans les supermarchés</i>	Quelques mW	Continu	Petites diodes lasers qui s'intègrent dans les appareils comme des composants électroniques ordinaires
Lasers d'alignement pour les travaux publics ou les carrossiers... <i>Guidage d'engins de travaux publics</i>	Environ 10 mW	Continu	Petits lasers (par exemple, lasers hélium-néon)
Lasers de transport des télécommunications	Quelques dizaines de mW	Continu ou impulsionnel	Petites diodes lasers. <i>Ces faisceaux laser sont transportés à travers toute la planète et sur de très longues distances le long de fibres optiques tendues sous terre ou dans la mer.</i>
Discothèques, Spectacles lasers	Quelques watts	Continu	Lasers à argon ou à hélium-néon, par exemple.
Applications médicales <u>Chirurgie interne</u> : <i>Opérations sans ouvrir le corps</i> <u>Chirurgie externe</u> : <i>Soins de l'oeil (décollements de rétine), Soins des dents (caries), bistouri...</i>	Puissance, fonction des applications	Continu ou impulsionnel	Lasers YAG ou lasers à CO ₂ . Les lasers utilisés pour des applications médicales sont assez puissants. Ils peuvent brûler une partie endommagée dans le corps, souder la rétine sur l'oeil ... Mais attention, le médecin ou le dentiste doivent avoir la main sûre. Cependant, aucun autre instrument ne permet une intervention aussi précise.
Nettoyage et préparation de surface (par exemple, décapage aux lasers des monuments historiques)	Puissances crêtes de l'ordre de 10 ⁷ à 10 ⁸ W <i>(pour des puissances de 10 à 20 W pour les lasers YAG, par exemple)</i>	Impulsionnel (très courtes impulsions : quelques dizaines à quelques centaines de nanosecondes)	Lasers excimères ou laser YAG Ce procédé permet d'éliminer totalement ou de façon sélective des couches surfaciques recouvrant différents matériaux sans les altérer en dessous, en concentrant le faisceau laser sur les zones à décaper.
Procédé d'enrichissement de l'uranium par lasers	Quelques centaines de watts	Impulsionnel	Lasers à vapeur de cuivre pompant des lasers à colorant. <i>(lasers discontinus : 5000 impulsions/seconde)</i>
Soudage des métaux	Quelques dizaines de watts à 50 kW <i>Puissance selon l'épaisseur</i>	Continu ou impulsionnel	<i>Lasers YAG (100 W à 2 kW) Lasers CO₂ (100 W à 50 kW)</i>
Découpage de matériaux tels que le bois, le plexiglass ou les métaux.	1 à 3 kW	Continu ou impulsionnel	
Lasers de puissance de recherche	Quelques térawatts	Impulsionnel	