

## Rappels

### **1. Dualité onde-corpuscule**

On parle de dualité onde-particule pour la lumière car la lumière est **à la fois une onde et une particule**

➡ L'effet photo-électrique montre que la lumière a un caractère particulaire

➡ La diffraction montre que la lumière est une onde

La particule de lumière est le **photon**

L'énergie d'un photon est:

$$E = h \nu$$

E: énergie en joule, h: **constante de Planck**,

**$\nu$**  : fréquence associée au photon

Remarque: on utilise l'électronvolt (eV) comme unité d'énergie

### **2. Relation de Broglie**

La relation de Broglie donne une **quantité de mouvement** et est:

$$p = h/\lambda$$

p: quantité de mouvement en  $\text{Kg.m.s}^{-1}$

h: **constante de Planck**

$\lambda$ : la longueur d'onde associé

On utilise principalement cette formule pour déterminer S'il nous suffit d'utiliser la mécanique newtonienne ou la mécanique des ondes, ou S'il est nécessaire d'utiliser la mécanique quantique.

➡ Elle permet de savoir si l'aspect particule ou l'aspect onde a une prédominance

# LE LASER : cours

## 1. Introduction

Le LASER est l'une des principales inventions du XX<sup>ème</sup> siècle, et, contrairement à la plupart des découvertes ce fut une invention à la fois pré-fantasmée et non-planifiée.

Le mot **LASER** est un acronyme, c'est à dire un sigle que l'on prononce comme un mot ordinaire, sans l'épeler. Laser est un sigle venu de l'anglais, il veut dire "amplification de lumière par émission stimulée" (**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation).

Les lasers sont des dispositifs qui produisent ou amplifient un rayonnement cohérent et directif pour des longueurs d'onde situées dans le domaine optique des ondes électromagnétique couvrant l'infrarouge, le visible et l'ultraviolet.

*En résumé, un laser est une source lumineuse qui produit un rayonnement monochromatique rectiligne.*

## 2. Historique

Les étapes scientifiques marquantes qui ont aboutit à la découverte du laser :

- 1887 : découverte de l'effet photoélectrique par Heinrich Hertz ce qui a aidé Albert Einstein à donner la notion de photons.
- 1901 : résolution du problème de la catastrophe ultraviolette (densité d'énergie divergente pour les hautes fréquences) par Planck grâce à l'hypothèse de sauts d'énergie discrets.
- 1905 : Einstein postule la quantification de l'énergie électromagnétique : la naissance le photon. Mais ce dernier ne permet pas de prendre en compte le rayonnement du corps noir.
- 1913 : Born montre la quantification des niveaux d'énergie des électrons (1913).
- 1917 : Einstein peut alors démontrer la compatibilité entre l'existence du photon et le rayonnement du corps noir en mettant en place la notion d'émission stimulée.
- 1949 : Kastler et Brossel réalisent le premier pompage optique et la première inversion de population.

- 1954 : Le premier dispositif MASER construit par Weber, Townes et Basov. Le MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission Radiation) est capable d'amplifier une onde électromagnétique dans le domaine des micro-ondes
- 1958 : Schawlow et Townes proposent d'utiliser une cavité ouverte de type Fabry-Perot. une seule dimension de confinement : l'axe de propagation de la lumière dans la cavité.
- le 16 mai 1960, Maiman réalise le premier effet LASER. Le milieu amplificateur utilisé était un cristal de rubis et la longueur d'onde optique obtenue était de 694,3 nm et ce laser fonctionnait en impulsions.
- 1961 : Javan, Bennet et Herriot réalisent un laser à gaz hélium-néon fonctionnant en continu à 1,15  $\mu\text{m}$ . Le laser hélium-néon peut en effet émettre sur toute une gamme de longueur d'onde discrètes allant du vert à l'infrarouge en passant par l'orange et le rouge (633 nm bien connu).
- 1962 : Premier laser Hélium Néon rouge (633 nm)
- 1965 : Lasers à semi-conducteurs.
- 1966 : Lasers à colorants pulsés (rouge, orange, jaune).
- 1970 : Lasers à colorants continus (rouge, orange, jaune).

Les lasers tout solides (diodes lasers, solides cristallins ou amorphes dopés par des ions actifs, lasers à fibre optique) sont les plus développés. Ils ont des impulsions de plus en plus courtes (la limite actuelle homologuée est de 4,5 fs soit  $4,5 \cdot 10^{-15}$  seconde et la tendance va vers des lasers de plus en plus puissants (des lasers émettant une dizaine de kilowatt).

### 3. Définition d'un laser :

Un laser comprend par 2 éléments fondamentaux :

- un milieu amplificateur : il est de différents types
  - gaz,
  - plasma,
  - solide
  - liquide

On peut y trouver des atomes, des molécules, des ions ou des électrons dont les niveaux d'énergie sont utilisés pour accroître la puissance d'une onde lumineuse au cours de sa propagation. Le principe physique mis en jeu est l'émission stimulée.

- un système d'excitation du milieu amplificateur ou système de pompage : il permet de créer les conditions d'une amplification lumineuse en apportant l'énergie nécessaire au milieu.

Les différents types de système de pompage sont :

1. pompage optique : le soleil, lampes flash, lampes à arc continues ou lampes à filament de tungstène, diodes laser ou autres lasers ...,
2. pompage électrique : décharges dans des tubes de gaz, courant électrique dans des semi-conducteurs ...
3. pompage chimique

#### 4. Fonctionnement d'un laser

Le milieu amplificateur (et son système de pompage) peut être utilisé seul pour amplifier une lumière déjà existante : c'est l'amplificateur laser.

Ce dernier est inséré dans un résonateur optique (ou cavité) dont la fonction est de produire un rayonnement lumineux aux propriétés très particulières : c'est l'oscillateur laser.

Les oscillateurs laser (ou raccourci le laser) ont pour particularité d'avoir des miroirs réfléchissants dont la fonction première est de confiner l'onde à l'intérieur de la cavité et d'augmenter son parcours dans le milieu amplificateur afin d'obtenir des niveaux d'amplification considérables. Ils ont également un miroir de sortie qui permet d'extraire une partie de l'onde lumineuse de la cavité afin de pouvoir utiliser le rayonnement.

On schématise, en figure 1, l'oscillateur laser avec ses éléments fondamentaux : le milieu amplificateur, le système de pompage, et les miroirs formant la cavité, dont le miroir de sortie.

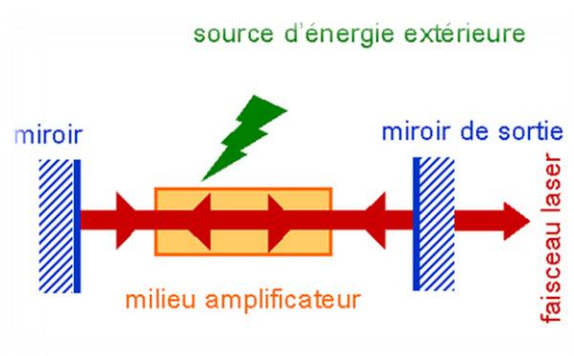


Figure 1 : Schéma d'un oscillateur laser.

## 5. Effet laser

L'émission stimulée est à la base de l'amplification lumineuse et donc au coeur même du fonctionnement d'un laser. Pour la comprendre, il faut la replacer dans le contexte des interactions entre la lumière et la matière.

Pour simplifier, on choisit les "atomes" (dans la suite) comme matière. Leur niveau d'énergie sont quantifiés et sont tels qu'une lumière d'une fréquence particulière va pouvoir interagir avec la population qui se trouve sur les niveaux. Pour être plus précis, considérons deux niveaux d'énergie  $E_1$  et  $E_2$  ( $E_1 < E_2$ ) dont la population va pouvoir interagir avec une lumière de fréquence  $\nu = (E_2 - E_1)/h$ . L'ensemble  $E_1$ - $E_2$  est appelé transition radiative si le passage des atomes de  $E_1$  à  $E_2$  (ou de  $E_2$  à  $E_1$ ) ne peut se faire que par interaction avec la lumière. Le niveau d'énergie  $E_1$  est appelé le niveau du bas et celui d'énergie  $E_2$ , le niveau du haut.

### Description des mécanismes d'émission-absorption

L'effet laser a sa source au niveau atomique. Il fait intervenir trois phénomènes fondamentaux : l'absorption, l'émission spontanée et l'émission stimulée. schématisés sur la figure 2 :

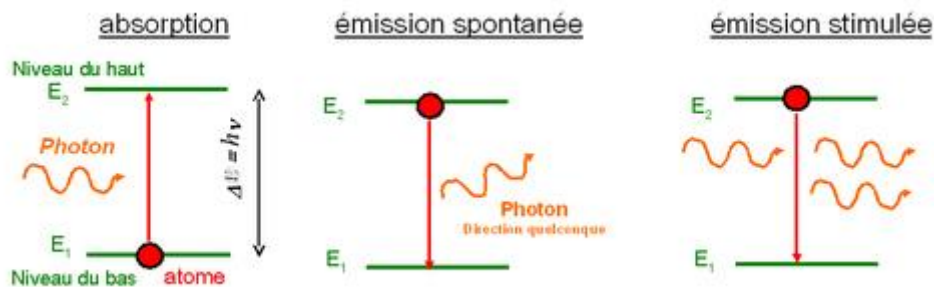


Figure 2 : Mécanisme d'interaction entre un atome et un photon. (On suppose que le photon a une énergie  $h\nu$  égale à la différence d'énergie entre les deux niveaux de l'atome).

#### a) Absorption :

Un atome du niveau du bas peut monter dans le niveau du haut par effet d'absorption d'un photon de fréquence  $\nu$ .

Elle correspond à la disparition d'un photon de fréquence  $\nu$  au cours de l'interaction lumière/système.

### **b) Emission spontanée :**

Un atome du niveau du haut peut se désexciter spontanément vers le niveau du bas et engendrer l'émission d'un photon de fréquence  $h\nu$  si la transition entre  $E_2$  et  $E_1$  est radiative.

Ce photon a une direction et une phase aléatoire.

C'est le phénomène réciproque de l'absorption, où l'on voit un atome excité au niveau d'énergie  $E_2$  retomber au niveau  $E_1$  en émettant un photon de fréquence  $\nu$ .

### **c) Emission stimulée**

C'est un effet plus particulier. Il exige d'abord la présence d'un photon stimulateur incident de fréquence  $\nu$ . Ce dernier désexcite un atome du système du niveau  $E_2$  vers le niveau  $E_1$ . A la fin du processus, on trouve deux photons, le stimulateur et le stimulé. Ces deux photons se propagent dans la même direction. De plus, le champ électrique de l'onde électromagnétique associée au photon stimulateur a la même direction que celui attaché au photon stimulé. On dit que les deux photons ont même polarisation. Enfin, les deux ondes associées aux photons stimulateur et stimulé : Le terme stimulé souligne le fait que ce type de rayonnement n'existe que si un photon incident est présent pour "stimuler l'émission". L'amplification vient des similitudes entre le photon incident et le photon émis. sont en phase.

## **Les compétitions entre les 3 mécanismes**

Comme dans une transition radiative, les trois mécanismes sont toujours présents en même temps il faut pour avoir l'effet laser trouver des conditions qui permettent de privilégier l'émission stimulée au détriment de l'absorption et de l'émission spontanée. Pour cela il faut :

- une sélection dans la nature les milieux qui pourront effectivement servir en tant que milieux laser.
- une assurance des bonnes conditions pour que l'effet laser ait lieu.

un photon incident d'énergie  $h\nu$  a autant de chance d'être absorbé par un atome du niveau du bas que d'être dupliqué (ou amplifié!) par interaction avec un atome du niveau du haut. L'absorption et l'émission stimulée sont vraiment deux processus réciproques soumis aux mêmes probabilités. Pour favoriser l'émission stimulée au détriment de l'absorption, la solution est de jouer sur les populations des niveaux : il faut s'arranger pour avoir plus d'atomes sur le niveau du haut que sur le niveau du bas.

L'émission spontanée a tendance à vider naturellement le niveau du haut. Il faut donc trouver un moyen de vider le niveau du haut plus vite par émission stimulée que par émission spontanée. Or il se trouve que l'émission stimulée est d'autant plus probable que le

milieu est éclairé avec un grand nombre de photons semblables. L'astuce va donc consister à éclairer fortement le milieu, un bon moyen pour cela est le confinement des photons dans une cavité.

## 6. Inversion de population et pompage

Avoir une population plus élevée dans le niveau du haut ( $N_2$ ) que dans le niveau du bas ( $N_1$ ) n'est pas une situation d'équilibre. A l'équilibre thermodynamique, la répartition des populations sur les niveaux est donnée par la loi de Boltzmann :

$$N_2 = N_1 \exp \left[ \frac{E_2 - E_1}{kT} \right]$$

Dans ce cas,  $N_2$  est toujours inférieure à  $N_1$ . Il faut donc créer une situation hors équilibre en apportant de l'énergie au système des atomes via un "pompage" dont l'objectif est d'amener suffisamment d'atomes sur le niveau du haut.

On définit ainsi l'**inversion de population** que l'on appelle  $\Delta N = N_2 - N_1$ . Il y aura amplification de lumière si l'inversion de population est positive.

## 7. Exemples des systèmes spectroscopiques des laser

On ne peut avoir d'effet laser avec tous les atomes, ions, molécules, car leurs différents niveaux d'énergie ne peuvent pas forcément donner lieu à une inversion de population. Leurs transitions qui sont purement radiatives (passage des atomes entre les niveaux uniquement par interaction avec la lumière). Il existe également des transitions qui présentent une part radiative et une part non radiative. Dans ce cas, le niveau du haut se vide non seulement par émission spontanée mais également par effet non radiatif. Ceci entraîne une difficulté supplémentaire pour arriver à faire une inversion de population car il est difficile de stocker des atomes sur le niveau du haut dans ces conditions. Les transitions de ce type sont également à éviter.

Il faut ensuite sélectionner des "atomes" présentant un ensemble de niveaux dont la position relative n'est pas quelconque dans l'objectif de réaliser une inversion de population.

Exemple : si on choisit  $E_1 > E_0$ , on peut limiter fortement le peuplement  $N_1$ , voire même l'annuler complètement (figure 3). Dans ce cas, il suffit d'apporter un atome dans le niveau du haut pour que l'inversion de population existe.

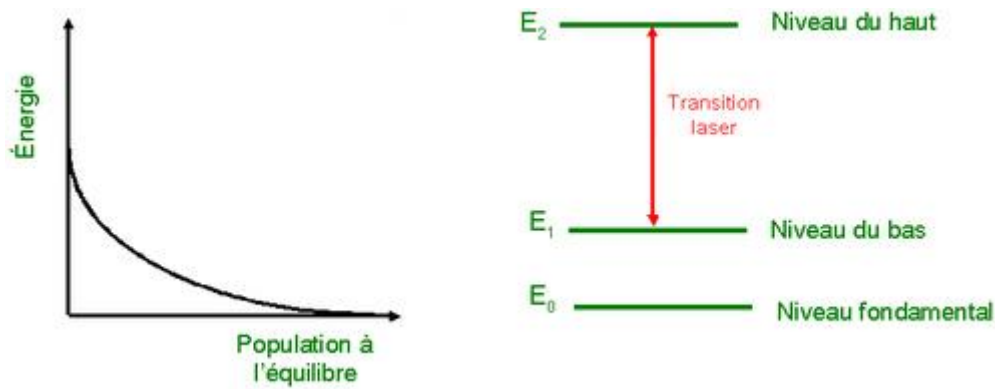


Figure 3 : Transition laser avec niveau du bas loin du fondamental. La population à l'équilibre thermodynamique est donnée par la loi de Boltzmann.

Il faut apporter les atomes dans le niveau du haut grâce à un pompage (optique ou électrique en particulier), celui-ci correspond à une certaine énergie qui doit pouvoir être transférée aux atomes du milieu. Il faut donc trouver un niveau excité tel que la différence d'énergie avec le niveau fondamental corresponde à cette énergie de pompage. Dans le cas d'un pompage optique, on peut montrer qu'il faut un minimum de trois niveaux pour réaliser une inversion de population. La figure 4 donne l'exemple d'un tel système.

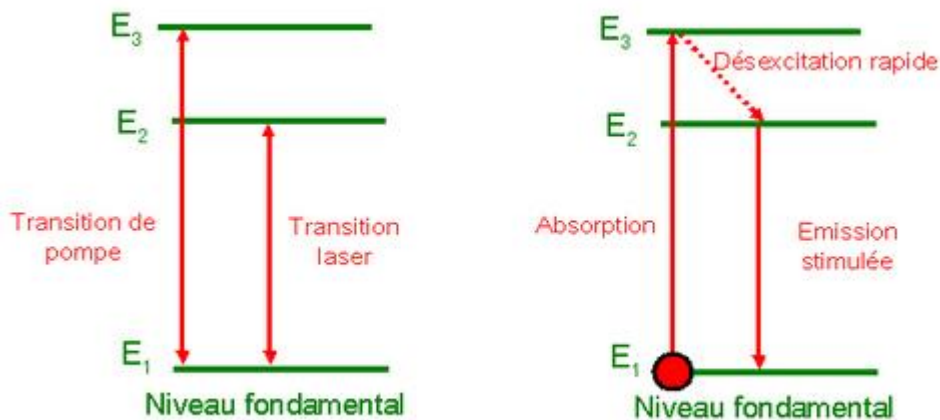


Figure 4 : Exemple d'un système à trois niveaux avec un pompage

On y distingue la transition dite de pompage (entre  $E_1$  et  $E_3$ ) et la transition laser (entre  $E_1$  et  $E_2$ ). L'objectif est de stocker les atomes dans le niveau  $E_2$  via le pompage par absorption d'un rayonnement dit "de pompe" dont la longueur d'onde est inférieure à la longueur d'onde de la transition laser. Pour cela, il faut que le niveau 3 se vide rapidement vers le niveau 2, et uniquement vers celui-là. Cette condition limite le choix des systèmes qui fonctionnent. La figure 4 présente également un cycle idéal pour un atome : il monte dans le niveau 3 par absorption d'un photon issu de la lumière de pompe. Il descend ensuite dans le niveau 2 très rapidement. Il se désexcite enfin par émission stimulée vers le niveau 1. Malgré sa simplicité, ce système n'est pas forcément facile à mettre en œuvre car le niveau du bas de la transition laser est très fortement peuplé à l'équilibre thermodynamique. Afin de réaliser une inversion de population, il faut déjà commencer



par vider le niveau fondamental de la moitié de ses atomes et les mettre dans le niveau 2. Il faut pour cela que le niveau 2 soit capable de stocker les atomes, et donc que l'émission spontanée ne soit pas très probable : ceci est une condition sur le choix du système. Il faut également une énergie de pompage importante.

Le premier laser qui a fonctionné dans le domaine optique était un laser de ce type : le laser à rubis met en effet en jeu 3 niveaux. La formule du rubis est :  $\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$

## 8. Le rôle de la cavité

C'est la cavité qui va créer les conditions favorables pour que l'émission stimulée devienne prédominante par rapport l'émission spontanée. La cavité ou résonateur optique est composée de miroirs qui permettent à la lumière de passer de nombreuses fois dans le milieu amplificateur. On peut trouver deux types de cavités (figure 7) : des cavités dites "linéaires" (la lumière fait des allers et retour) ou des cavités en anneau (la lumière fait des tours). On suppose dans la suite une cavité linéaire.

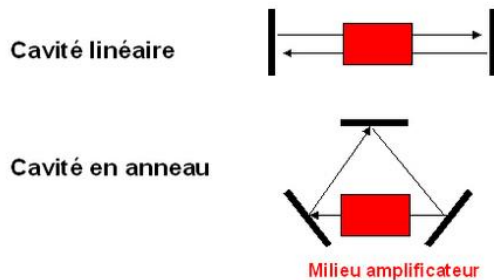


Figure 7 : Les deux types de cavité.

Au démarrage du laser, la "lampe-milieu amplificateur" émet spontanément dans toutes les directions. Une petite partie de l'émission se trouve dans l'axe de la cavité laser et va faire des allers et retours. Ainsi, milieu amplificateur va jouer son rôle en augmentant considérablement la quantité de lumière présente dans la cavité. Le confinement de la lumière va ainsi accroître la probabilité d'émission stimulée, au détriment de l'émission spontanée. Cette cavité va aussi jouer le rôle de filtre à cause des multiples allers et retours : seule l'onde parfaitement perpendiculaire à l'axe de la cavité pourra se propager et certaines fréquences seront privilégiées (fréquences de résonance de la cavité). Par conséquent, la cavité donne au rayonnement laser avec des propriétés si particulières (directivité, finesse spectrale).

Après plusieurs dizaines de milliers d'allers et retours (en général), la quantité de photons générée dans l'axe de la cavité par émission stimulée sera égale à celle qui est perdue (en particulier via le miroir de sortie). Il va donc y avoir un état stationnaire pour lequel un rayonnement (dit rayonnement laser) sort de façon continue par le miroir de sortie. On dit alors que le laser oscille : c'est à dire que le laser émet en continu un rayonnement majoritairement issu de l'émission stimulée filtré par la cavité.