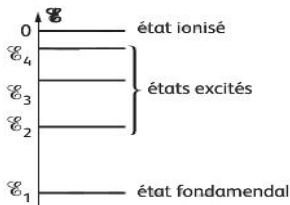


# Transfert quantique d'énergie

## Le Laser

### 1. ABSORPTION ET MESURE QUANTIQUE

#### 1.1. QUANTIFICATION DES NIVEAUX D'ENERGIE

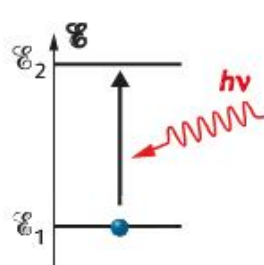


Les niveaux d'énergie d'un atome sont quantifiés. Ils ne peuvent prendre que des valeurs bien déterminées, caractéristiques de l'atome:

- Lorsqu'un atome est à son niveau d'énergie le plus bas, il est dans son état fondamental. C'est l'état stable de l'atome.
- Lorsqu'un atome est à son niveau d'énergie plus élevée, il est alors dans son état excité.

On appelle transition quantique le passage de l'atome d'un état à un autre.

#### 1.2. ABSORPTION ET EMISSION SPONTANEE



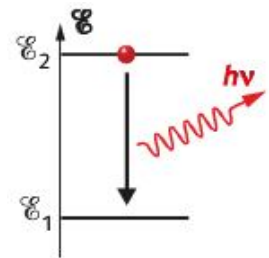
Les échanges d'énergie entre les atomes et la lumière sont quantifiés: ils se font par paquets d'énergie appelés photons.

L'énergie  $E$  d'un photon a pour expression  $E = h \cdot \nu$  avec la constante de Planck  $h = 6,63 \times 10^{-34}$  J.s

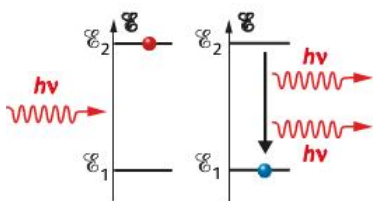
et  $\nu$  la fréquence en Hz.:

- Un atome initialement au repos au niveau fondamental d'énergie  $E_1$  peut passer au niveau excité supérieur d'énergie  $E_2$ , en absorbant un et un seul photon d'énergie  $\Delta E = h \cdot \nu = E_2 - E_1$

- Réciproquement, l'atome au niveau excité supérieur d'énergie  $E_2$ , peut revenir au niveau inférieur d'énergie  $E_1$  en émettant un et un seul photon d'énergie  $\Delta E = h \cdot \nu = E_2 - E_1$



#### 1.3. EMISSION STIMULEE



Un photon peut interagir avec un atome, même si cet atome est dans son état excité. Le photon incident ne peut pas être absorbé, mais il induit la désexcitation de l'atome qui revient dans son état fondamental en émettant un photon identique au photon incident (même fréquence, même direction et déphasage nul): c'est l'émission stimulée.

Les photons produits par émission stimulée augmentent donc l'énergie de l'onde qui interagit avec les atomes.

#### 1.4. CONCURRENCE DES DEUX EMISSIONS

L'émission spontanée et l'émission stimulée sont deux modes de désexcitation des atomes qui sont en concurrence.

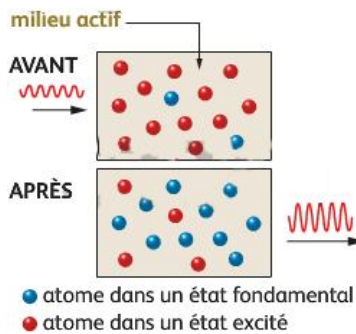
Lorsqu'un atome est dans son état fondamental, il y reste jusqu'à ce qu'un photon, une décharge électrique, .... lui apporte l'énergie nécessaire pour passer dans un état excité. Au contraire, lorsqu'un atome est dans un état excité, il se désexcite spontanément et quasi instantanément pour revenir à son état fondamental.

Dans une population d'atomes, il y a donc beaucoup plus d'atomes dans l'état fondamental que dans un état excité. L'émission stimulée est un phénomène très peu probable par rapport à l'émission spontanée. Si peu probable qu'elle n'a été observée qu'en 1928 alors qu'Einstein avait prévu son existence dès 1917.

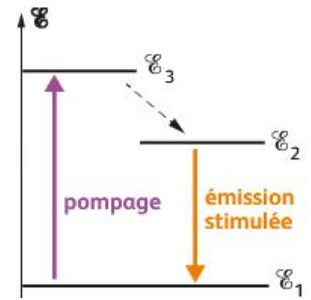
## 2. APPLICATION AU LASER: PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU LASER

Contrairement aux autres sources de lumière qui utilisent l'émission spontanée, la lumière du laser est produite par émission stimulée. Réaliser un laser consiste donc à favoriser l'émission stimulée au détriment de l'émission spontanée.

### 2.1. LE POMPAGE OPTIQUE

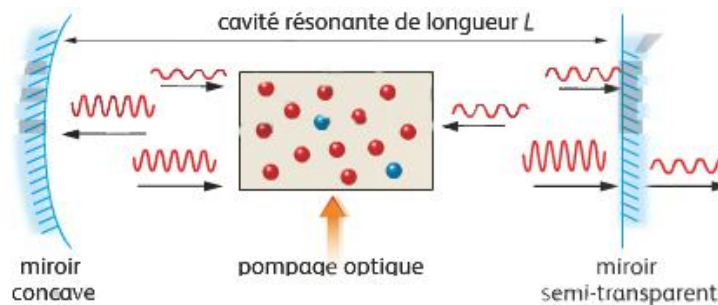


Lorsqu'une radiation de fréquence  $\nu$ , telle que  $h \cdot \nu = E_2 - E_1$ , traverse un milieu dont les atomes sont dans l'état excité  $E_2$ , elle provoque alors la désexcitation des atomes par émission stimulée. L'énergie des atomes est ainsi transférée à l'onde incidente dont l'énergie se trouve amplifiée. Le milieu traversé par l'onde, appelé milieu actif, constitue alors un amplificateur de lumière.



Ceci n'est possible que s'il y a beaucoup plus d'atomes dans un état excité que dans l'état fondamental (les atomes dans l'état fondamental absorbent les photons). Il faut pour cela réaliser une inversion de population. Cette opération peut être effectuée par un pompage: un excitateur, une décharge électrique ou un faisceau lumineux (on parle alors de pompage optique), excite les atomes qui passent du niveau fondamental  $E_1$  à un niveau excité  $E_3$ , légèrement supérieur à  $E_2$ . Les atomes du niveau 3 peuplent le niveau 2 en se désexcitant très rapidement ce qui réalise l'inversion.

### 2.2. LA CAVITE RESONANTE



Pour amplifier davantage l'onde, on peut lui faire parcourir un très grand nombre d'aller-retour dans le milieu actif. On réalise pour cela une cavité résonante à l'aide de deux miroirs: l'un est un miroir sphérique (concave) pour maintenir le faisceau sur l'axe de symétrie du dispositif, et l'autre est un miroir semi-transparent pour transmettre à l'extérieur de la cavité une partie de la lumière.

Les ondes réfléchies par le miroir interfèrent dans la cavité.

Les interférences sont constructives si la longueur  $L$  de la cavité vérifie la relation  $2L = k\lambda$  avec  $\lambda$  la longueur d'onde dans le milieu actif et  $k$  un entier non nul

### 2.3. OSCILLATEUR OPTIQUE

L'énergie rayonnée par le laser augmente avec l'amplification de l'onde dans la cavité résonante.

Un régime stable s'installe dans la cavité optique lorsque l'énergie rayonnante devient égale à l'énergie fournie par le pompage optique. L'amplitude de l'onde est alors constante.

Le phénomène est analogue aux oscillations d'amplitude constante d'un pendule entretenu. La dissipation de l'énergie du pendule due aux frottements est compensée par un apport extérieur («énergie potentielle de pesanteur»). Le laser constitue un oscillateur optique entretenu: l'énergie fournie par le pompage compense l'énergie perdue par émission: le laser constitue un oscillateur optique entretenu.

### 3. PROPRIETES ET APPLICATIONS DU LASER

♦ **Directivité:** Le faisceau émis par un laser est très directif: sur un écran placé à 100 m, le diamètre de la tache est de l'ordre de 10 cm. Cette directivité est utilisée:

- ♦ pour réaliser des alignements;
- ♦ pour mesurer des distances comme la distance Terre-Lune.

♦ **Monochromaticité:** La lumière du laser est monochromatique. En effet, la cavité résonante, de longueur  $L$ , n'amplifie par les interférences constructives que les ondes de longueur d'onde  $\lambda$  telle que:  $2L = k\lambda$ . Cette monochromaticité est utilisée:

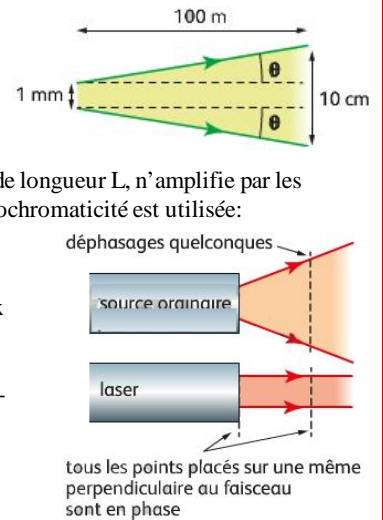
- ♦ pour mesurer des vitesses par effet Doppler;
- ♦ pour refroidir des atomes.

♦ **Cohérence:** Dans une source ordinaire, la lumière est produite par émission spontanée. Deux atomes voisins se comportent donc comme des sources indépendantes et incohérentes l'une avec l'autre. Pire, deux émissions successives du même atome sont incohérentes entre elles. Dans un laser, la lumière est produite par émission simultanée: deux atomes voisins se comportent alors comme des sources cohérentes, propriété qui confère à la lumière laser sa grande cohérence. Cette grande cohérence est utilisée:

- ♦ en laboratoire: hologrammes, mesures;
- ♦ dans la vie quotidienne: lecture de CD ou de DVD.

♦ **Concentration spatiale et temporelle:** Les lasers sont des sources lumineuses très intenses car l'énergie rayonnante est concentrée dans un pinceau très étroit. De plus cette énergie rayonnée peut être concentrée dans le temps: les lasers à impulsions émettent des radiations d'une puissance considérable pendant une durée très brève. Cette concentration de l'énergie est utilisée:

- ♦ dans la recherche: essais de fusions thermonucléaire;
- ♦ dans l'industrie: soudure, découpe, usinage des métaux;
- ♦ en médecine: bistouri optique en microchirurgie.

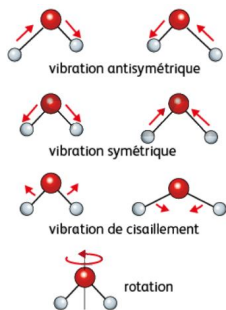


### 4. DOMAINE SPECTRAL ET TRANSITIONS QUANTIQUES

Comme les atomes, toutes les entités (molécules, ions, noyaux) possèdent des niveaux d'énergie quantifiés. L'ordre de grandeur de l'énergie des photons échangés lors des transitions entre deux niveaux dépend beaucoup de la nature de l'énergie mise en jeu:

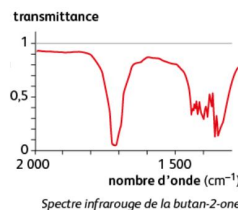
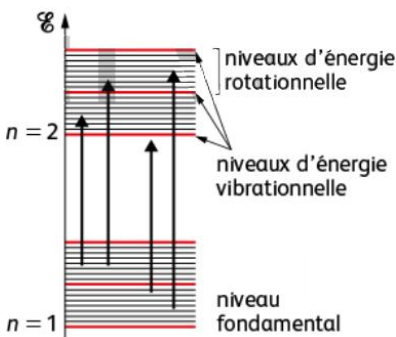
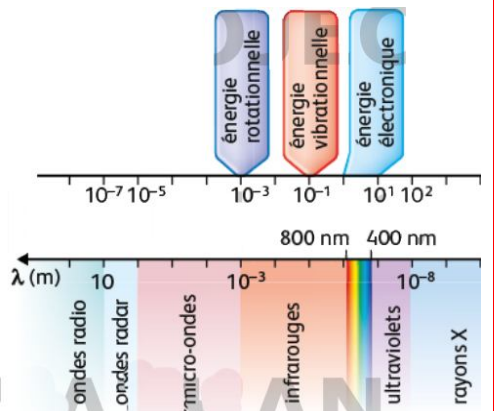
- ♦ **L'énergie des noyaux:** lors des réactions nucléaires, les noyaux sont généralement obtenus dans un état excité. La différence d'énergie entre deux niveaux est de l'ordre du MeV.
- ♦ **L'énergie électrostatique:** les atomes qui constituent les molécules possèdent différents niveaux d'énergie. La différence d'énergie entre deux niveaux est de l'ordre de 10 eV pour les électrons des couches internes et de 1 eV pour les électrons de valence.

Les molécules possèdent différentes énergies, toutes quantifiées:



- ♦ **L'énergie des noyaux:** comme pour les atomes.
- ♦ **L'énergie électronique:** de l'ordre de 1 eV;
- ♦ **L'énergie vibrationnelle:** énergie de vibration des atomes dans la molécule de l'ordre de  $10^{-1}$  eV;
- ♦ **L'énergie rotationnelle:** énergie de rotation de la molécule autour de ses différents axes, de l'ordre de  $10^{-3}$  eV.

A chaque photon d'énergie  $\Delta E$  est associée une radiation de fréquence  $\nu$  telle que  $\Delta E = h\nu$ . La longueur d'onde  $\lambda$  de la radiation est d'autant plus courte que l'énergie  $\Delta E$  transportée par le photon est grande.



Chaque niveau d'énergie électronique est associé à un très grand nombre de valeurs pour les énergies vibrationnelles et rotationnelles, induisant ainsi une multitude de transitions possibles. Cependant, les raies d'absorption ont des fréquences trop voisines pour pouvoir être discernées: on observe alors des bandes d'absorption. L'étude de ces bandes permet au chimiste d'identifier les liaisons des molécules et de mettre en évidence les groupes caractéristiques des molécules organiques.