

# OPTIQUE 2EME PARTIE

## EMISSION DE LA LUMIERE PAR LA MATIERE

### I. PHENOMENES PHYSIQUES

#### A. INCANDESCANCE

C'est une émission de lumière d'origine thermique par des corps chauffés à haute température.

#### B. LUMINESCENCE

C'est une émission de lumière dite « **froide** » qui n'est pas d'origine thermique. Elle est consécutive à un apport d'énergie qui fait passer l'atome d'un **état fondamental stable** à un **état excité non stable** avec une énergie plus élevée.

Il existe plusieurs types de luminescence selon le **mode d'excitation** : par exemple l'électroluminescence pour une excitation par un champ électrique, la photoluminescence pour une excitation par la lumière ...

Lorsque notre atome est excité il va retourner au **niveau fondamental directement** ou par **l'intermédiaire** d'un ou plusieurs niveaux.

On va avoir une **émission de photons** lorsque il y a au moins une **transition de désexcitation radiative**.

Ainsi la fréquence et la longueur d'onde sont données par la transition de Bohr :

$$E_2 - E_1 = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

#### C. PHOTOLUMINESCENCE : FLUORESCENCE ET PHOSPHORESCENCE

La photoluminescence : c'est l'absorption puis la rémission de lumière.

⇒ Photoluminescence par **fluorescence** : le **temps de déclin** est très **rapide**, elle s'arrête lorsqu'on stoppe l'illumination

⇒ Photoluminescence par **phosphorescence** : le **temps de déclin** est plus **long** car il y a des **états intermédiaires** avant l'émission de lumière, lorsqu'on stoppe l'illumination elle **persiste**

La **phosphorescence** n'est observable qu'avec un **milieu rigide**.

### II. LUMINESCENCE ATOMIQUE

#### A. SPECTRES DE RAIES

L'excitation d'un atome conduit à un spectre de raies.

⇒ Si **un gaz a une basse pression** : on va avoir **peu de collisions** entre les atomes ainsi il y a **un seul niveau excité** donc il va y avoir une émission de photons d'une seule énergie ainsi il y a **une seule raie**

⇒ Si **un gaz a une haute pression** : on va avoir des **collisions** entre les atomes ce qui favorise des passages entre des **états excités intermédiaires et des états d'énergie plus élevée** il y a donc des excitations successives => on va avoir des photons de différentes énergies ainsi le nombre **de raies augmente**

#### B. DIAGRAMME D'ENERGIE

Lorsqu'un atome absorbe un photon on a **trois possibilités** pour le retour de l'atome **de l'état excité à l'état fondamental** :

⇒ Emission d'un **photon de même énergie** c'est un phénomène de résonance :

$$h\nu_1 = E_{abs} = h\nu_{abs}$$

⇒ Emission de **plusieurs photons** avec des passages par **niveaux intermédiaires**

$$h\nu_{2a} < E_{abs} \text{ et } h\nu_{2b} < E_{abs}$$

⇒ L'atome passe par un **état métastable** par le biais d'une **transition non radiative** : on va avoir un **photon de phosphorescence** :  $h\nu_3 < E_{abs}$

### III. LUMINESCENCE MOLECULAIRE

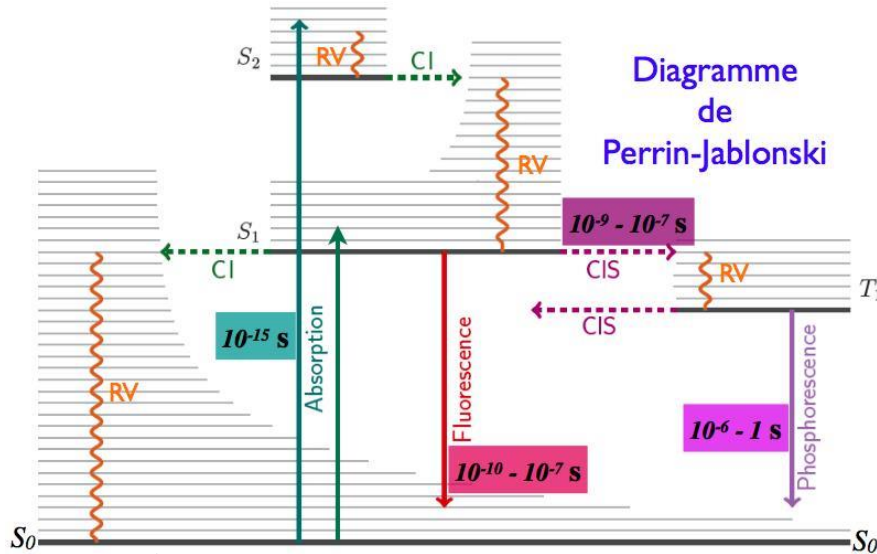
Elle est associée à un ensemble d'atomes dans une matrice solide ou liquide.

On va donc avoir des niveaux d'énergie associés aux électrons mais aussi aux interactions entre les atomes. Ainsi il y aura des sous niveaux vibrationnels et rotationnels.

#### A. DIAGRAMME DE PERRIN-JABLONSKI

Après absorption d'un photon plusieurs voies peuvent être prises : des désexcitations non radiatives ou radiatives.

Il schématise l'ensemble des processus d'excitation et de désexcitation possibles.



- ⇒ Les barres pleines horizontales et en gras sont les niveaux d'énergie singulets ( $S_0$ ,  $S_1$  ...) et les états excités triplets  $T_1$
- ⇒ Barres horizontales fines : sous niveaux vibrationnels et rotationnels
- ⇒ RV : relaxation vibrationnelle

#### 1. TRANSITIONS NON RADIATIVES

- ⇒ **La relaxation vibrationnelle** elle permet le passage via des collisions entre des molécules : d'un niveau sous-niveau vibrationnel au plus bas niveau vibrationnel d'un même niveau
- ⇒ **Conversion interne** : elle permet le passage du plus bas niveau vibrationnel (état singulet  $S_n$ ) à un sous-niveau vibrationnel d'énergie équivalente à  $S_n$  mais appartenant à un niveau vibrationnel d'énergie inférieure ( $S_{n-1}$ ). Elle peut engendrer une relaxation vibrationnelle.
- ⇒ **Croisement inter-système** : il est dû au spin des électrons d'une molécule : des niveaux d'énergie avec des états de spin différents conduisent à des niveaux d'énergie différents. C'est le passage d'un état singulet à un sous-niveau vibrationnel d'un triplet (donc de  $S_1$  à un état excité de  $T_1$ )

#### 2. TRANSITIONS RADIATIVES

Il s'agit d'émission spontanée entre le sous-niveau le plus bas d'un état électronique à un sous-niveau d'un autre état électronique de plus basse énergie.

	Fluorescence	Phosphorescence
<b>Définition</b>	C'est lorsqu'on a un passage d'un <b>niveau excité</b> à un <b>niveau d'énergie inférieure</b> par émission de <b>photon</b> d'énergie égale à la différence d'énergie entre les 2 niveaux. Ex : passage du <b>niveau singulet <math>S_1</math></b> à un des <b>niveaux vibrationnels</b> du niveau fondamental $S_0$	C'est lorsqu'on a un passage d'un <b>niveau excité (triplet)</b> vers un <b>niveau d'énergie inférieur</b> . Les atomes vont rester longtemps dans un état triplet ainsi la durée de déclin est très longue.
<b>Temps de déclin</b>	Rapide : $10^{-11} \rightarrow 10^{-7}$ s	Longue : $10^{-6} \rightarrow 1$ s / 1h

### 3. SPECTRES DE LA FLUORESCENCE ET DE LA PHOSPHORESCENCE

Les photons émis par fluorescence ont une énergie inférieure ou égale à celle des photons absorbés. Ainsi leur longueur d'onde est supérieure.

Les photons émis par phosphorescence ont une énergie encore plus faible que celle de la fluorescence et donc une longueur d'onde encore plus grande.

$$E_{abs} \geq E_{fluoro} > E_{phospho}$$

$$\lambda_{abs} \leq \lambda_{fluoro} \leq \lambda_{phospho}$$

#### B. RENDEMENT QUANTIQUE

L'efficacité de fluorescence d'une molécule est déterminée par son rendement quantique  $\phi$  qui est égal au rapport entre le nombre de photons de fluorescence émis et le nombre de photons de fluorescence absorbés par cette molécule.

$$\phi = \frac{\text{nombre photons émis}}{\text{nombre photons absorbés}} < 1$$

Le rendement  $\phi$  varie en fonction de l'**environnement** et du **fluorophore**.

#### C. DUREE DE VIE

Le nombre de molécules excitées (N) diminue de façon exponentielle avec  $\tau$  le temps de déclin ou durée de vie à l'état excité :

$$N = N_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

$N_0$  : nombre de molécules à l'instant

$\tau$  varie en fonction de l'**environnement** et est de l'ordre de nanosecondes pour les fluorophores.

Ce temps de déclin peut être trouvé :  $\tau = \phi_f \times \tau_r$

$\phi_f$  : rendement quantique de fluorescence  
 $\tau_r$  : durée de vie radiative du plus bas sous niveau de l'état excité

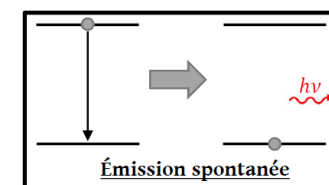
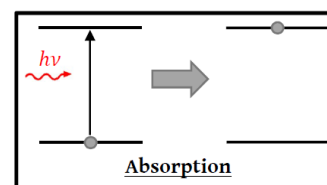
## LASERS

### I. L'EFFET LASER

#### A. EMISSION SPONTANEE ET EMISSION STIMULEE

##### 1. EMISSION SPONTANEE

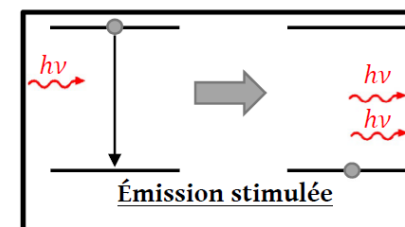
Les atomes et les molécules après excitation peuvent revenir à leur état fondamental par émission spontanée de photons (de fluorescence ou de phosphorescence) de façon aléatoire et dans toutes les directions.



##### 2. EMISSION STIMULEE

Il existe un autre type d'émission dite **induite** : c'est-à-dire qu'un photon incident envoyé sur un atome excité peut **le forcer à se désexciter** en émettant un **photon de caractéristiques identiques** à celle du photon incident (**même énergie**, même **quantité de mouvement** et même **polarisation**).

Ces **2 photons identiques** en **phase** (donc on a des interférences **constructives**) peuvent à leur tour provoquer l'**émission stimulée** d'un autre atome ainsi on a une **amplification de lumière** monochromatique et cohérente : c'est l'**effet laser**.  
 LASER = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.



## B. PRINCIPES DE BASE DU LASER

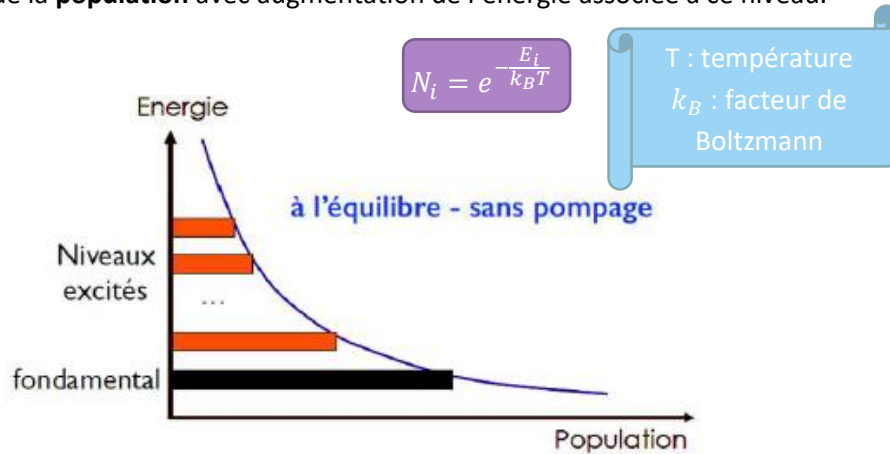
Le laser est composé :

- ⇒ D'un **milieu amplificateur** dans lequel on veut déclencher **une émission stimulée**
- ⇒ D'une **source externe d'énergie** qui permet aux molécules de se trouver dans leur **état excité**
- ⇒ D'une **cavité résonnante** : avec 2 miroirs qui **amplifient le rayonnement induit**

## II. PRINCIPE DU POMPAGE

### A. STATISTIQUE DE BOLTZMANN

A l'équilibre thermodynamique les populations des niveaux d'énergie E sont régies par la **statistique de Boltzmann** qui prédit une **diminution exponentielle** de la **population** avec augmentation de l'énergie associée à ce niveau.



Ainsi plus le niveau d'énergie est élevé plus le nombre d'atomes excités est petit. Donc l'inversion de population est impossible à l'équilibre thermodynamique.

### 1. INVERSION DE POPULATION

Dans les **conditions normales** les atomes sont dans leur **état fondamental**. Pour produire une **quantité importante de lumière** cohérente par effet laser il faut amener **beaucoup d'atomes dans un état excité**.

On a l'**inversion de population** quand il y a **plus d'atomes dans l'état excité** que dans l'**état fondamental**.

$$N_{excité} > N_{fondamental}$$

### B. POMPAGE

Le pompage assure l'inversion de population en forçant les molécules ou les atomes du milieu à passer dans un état excité :

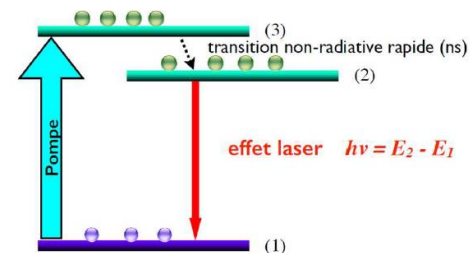
La probabilité d'émission stimulée est égale à la probabilité d'absorption. On ne peut pas obtenir d'inversion de population en pompant une seule transition => on ne peut avoir de laser à 2 niveaux. Dans le cas d'un laser à 2 niveaux on aura au maximum pour un fort pompage :  $N_1 = N_2$  appelé seuil de transparence.

Il faut au minimum un laser à 3 niveaux pour observer l'effet laser.

## III. LASER A 3 NIVEAUX

### PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Les atomes dans leur état fondamental (E1) sont excités vers le niveau 3 grâce au **pompage**.



On aura des **transitions non-radiatives** rapides qui entraînent le peuplement du niveau 2 à partir du niveau 3.

Le niveau 2 est **d'énergie intermédiaire** et est **métastable** : cad qu'il a une durée de vie longue ainsi il se repeuple moins vite le niveau 1.

Donc au fur et à mesure qu'on dépeuple le niveau 1 on ne le repeuple pas pour autant à partir du niveau 2.

Ainsi lorsqu'on a un fort pompage on va avoir une **inversion de population** entre les niveaux 1 et 2 : on a **dépassé le seuil de transparence**.

**Exemple de laser à 3 niveaux :**

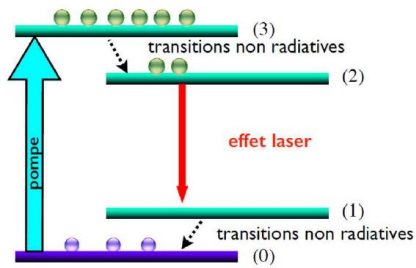
- Le laser à rubis de Maiman : il émet un faisceau de lumière rouge

**IV. LASER A 4 NIVEAUX**

**A. COMPOSITION**

Il est composé d'un **niveau supplémentaire** 1 d'énergie un peu plus élevée que le niveau fondamental  $E_0$  mais assez éloigné de celui-ci pour que  $(E_1 - E_0) > k_B T$ , le niveau 1 est ainsi presque **vide** à l'équilibre thermodynamique.

**B. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT**



Les atomes dans leur état fondamental (0) vont être excité vers le niveau 3 => on a un **pompage**.

Il va y avoir **des transitions non radiatives** rapides qui entraînent le peuplement du niveau 2 à partir du niveau 3.

Comme le niveau 1 est quasiment **vide** on va avoir une **inversion de population** entre le niveau 1 et le niveau 2 dès que le pompage est actif ainsi il n'y a **pas de seuil de transparence** contrairement au laser à 3 niveaux.

**Exemple de laser à 4 niveaux :**

- Laser solide à base de Néodyme : il émet dans le proche infrarouge

**V. ROLE DE LA CAVITE RESONNANTE**

**A. GENERALITES**

**1. INTERET**

Elle permet de réfléchir les photons émis afin qu'ils traversent plusieurs fois le milieu amplificateur. On augmente ainsi l'amplification du faisceau lumineux.

**2. CAVITE FABRY-PEROT**

C'est une cavité constituée de 2 miroirs plans parallèles : l'un est partiellement réfléchissant ainsi on aura une transmission d'une partie du faisceau laser.

**3. MODES LONGITUDINAUX ET PRINCIPES DE RESONNANCE**

Il faut que les modes longitudinaux correspondent à des résonances de la cavité pour avoir ainsi un système d'ondes stationnaires.

La condition pour qu'il y ait une résonance ou un rebouclage en phase sur un aller-retour :

$$v = \frac{nc}{2L} = nv_0$$

La cavité laser peut être interprétée comme une corde vibrante fixée à ses deux extrémités.

$v$  : la fréquence des photons  
 $L$  : la longueur de la cavité  
 $n$  : nombre entier positif  
 $c$  : célérité de la lumière

**B. CONDITION D'OSCILLATION LASER**

**1. PRINCIPE**

On suppose que **les pertes dues à l'absorption** dans la cavité soient au moins compensées par **l'amplification laser** :

La **condition d'oscillation** s'écrit :  $G(1 - \eta) > 1$

$G$  : le gain du milieu actif  
 $\eta$  : les pertes sur un aller-retour

Si on connaît la longueur du milieu actif notée  $l$  on a :

$$G = e^{2gl}$$

## 2. APPROXIMATION DES GAINS FAIBLES

Si  $gl$  est petit on peut approximer :  $G = 1 + 2gl$  et si  $\eta$  est lui aussi petit devant 1, on a alors :

$$2gl > \eta$$

## C. NOMBRE DE MODES ACTIFS

### PRINCIPE

Plusieurs fréquences peuvent être favorisées dans la cavité créant ainsi plusieurs modes.

Le nombre de modes actifs se trouve en faisant :

$$\frac{\nu_2 - \nu_1}{\nu_0} = x$$

$\nu_2 - \nu_1$  : l'intervalle de fréquence  
 $\nu_0$  : fréquence fondamentale de résonance

⇒ On prend  $i$  un entier supérieur à  $x$

⇒ On aura ainsi le nombre de modes actifs qui vaut **soit  $i$  soit  $i-1$**

## D. MODES TRANSVERSES

### 1. PRINCIPE

Les photons étant dans **un système tridimensionnel** ainsi on retrouve des photons dans la **direction perpendiculaire aux miroirs** bordant la cavité.

Ils sont analogues aux modes de vibration de la membrane d'un tambour car ils sont caractérisés par leur profil spatial.

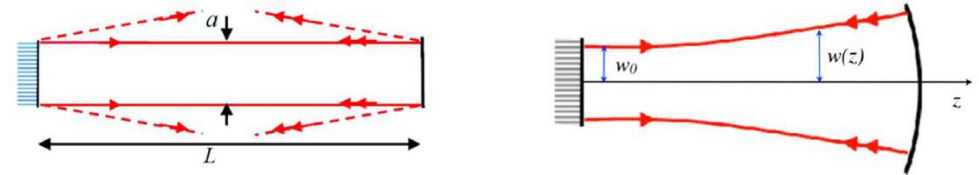
Le **premier mode transverse** est noté  $00$  est celui dont les **pertes par diffraction** sur les bords sont **les plus faibles**. Ainsi lorsqu'on construit un laser on essaie d'obtenir ce premier profil pour avoir une **cohérence spatiale et une directivité**.

Ces modes tiennent compte des pertes par diffraction. Elles sont **négligeables** si :

$$\lambda L \ll a^2$$

## 2. LIMITATION DES PERTES PAR DIFFRACTION

Pour limiter les pertes par diffraction on va utiliser une **cavité stable à miroir concave** ainsi on limite l'élargissement du faisceau.



## VI. DIFFERENTS TYPES DE LASER

	Lasers solides			Laser à gaz	Laser semi-conducteurs ou diodes laser			Laser à colorant
<b>Composition</b>	Rubis de Maiman	A néodyme	1 barreau de saphir dopé en titane	Hélium-néon	Jonction de semi-conducteur			Molécules organiques fluorescentes dans des solvants
<b>Fonctionnement</b>	<i>Laser à 3 niveaux Pompage par tube flash (non dit par le prof)</i>	<i>Laser à 4 niveaux Milieu actif : verre</i>	Pompage optique par un autre laser à base de néodyme (différent de celui d'à côté)	Alimentation électrique On excite les atomes d'hélium -> transfert de cette énergie par collisions aux atomes de néon	On a des groupes de niveaux, permettent d'accorder le laser entre ces groupes			<i>Pompage optique car les molécules de colorant sont diluées -&gt; incapables de conduire correctement le courant électrique</i>
<b>Longueur d'onde émise</b>	Rouge	1,06 µm (proche de l'IR)	De l'UV à l'IR	Principale émission à 633, sinon dans le non visible	<i>GaAS : 840</i>	<i>AlGaAS : 760</i>	<i>GaInAsP : 1300</i>	<i>Intéressante, accordable sur une large gamme</i>
<b>Remarques</b>		<i>Existence de bandes de niveaux permettant d'être accordable</i>	Laser sophistiqué et chers Il a 2 avantages : ⇒ Accordable ⇒ Peut fonctionner en impulsionnel	15% d'hélium 85% de néon	Les plus faciles à fabriquer, les plus couramment utilisés dans la vie de tous les jours Peu directionnels et pas très puissants			Très peu utilisé, car s'use très rapidement (photo-dégradation)

Ce que je vous ai mis en *italique* ce sont les précisions de l'ancienne tutrice qui ne figurent pas dans la ronéo.

On arrive à bout de cette fiche 😊 maintenant place aux **dédis** :

Déjà à la famille des tuteurs, parce que ce sont les meilleurs

Ensuite à Lucie ma co-tut avec qui on essaie de vous faire apprécier notre magnifique matière

A Amandine et Marie nos vieilles de physique qui nous soutiennent dans notre travail

A la team UE3a qui sont des amours

A mes fillotes : Lily-Rose, Romane, Clara, Shanna et Myly je crois en vous les filles !

A Laura ma co-marraine

A tous les P1 que je connais : Marie, Léa, Lou et Lucas : vous allez tout défoncer !

A Marie alias BloodyMary qui galérait avec ses matrices pendant que je faisais la fiche (le meilleur pour la fin)