

Fiche n°5 (ronéo 7) : Émission de lumière par la matière et effet LASER

I. Les différents phénomènes de rayonnements

L'émission de lumière par la matière se fait surtout selon 2 phénomènes

A. L'incandescence

Incandescence : lumière d'origine **thermique**, i.e. corps chauffé à **haute température** par des **échanges de chaleur**, par **thermodynamie** (**ex** : lumière Soleil/flamme d'une bougie). La lumière est ainsi issue de l'**agitation des atomes**, c'est l'exemple du corps noir (cf. fiche 4)

B. La luminescence

Quand les effets thermiques sont **négligeables**, on aura une « **lumière froide** »
On apporte de l'énergie à la matière, qui va exciter les atomes → **Luminescence**, si cette énergie est apportée par un courant électrique, on aura un phénomène d'**électroluminescence** et si c'est par un rayon lumineux → **photoluminescence**
Il y a un retour du système vers l'**état fondamental** par **émission de photons** (suivant plusieurs phénomènes que l'on va décrire ensuite).

Photoluminescence : un photon qui arrive sur atome dans son état fondamental va être absorbé, puis va se **désexciter** (en général) par **émission** de **1 ou plusieurs photons**.

NB : l'absorption se fait sur un intervalle énergétique **plus grand** que l'émission qui s'en suit

→ **la luminescence n'est PAS liée à l'agitation d'atomes et de molécules (du fait de la température)**

1. Phosphorescence VS fluorescence

Phosphorescence : les éléments excités passent par un état intermédiaire, dit **métastable**. Le déclin de la fluorescence est **plus rapide** (10^{-9} s) que celui de la phosphorescence (de 10^{-5} à 10^4 s)

Cristal de calcite :

1/ éclairage à la **lumière blanche** sur le cristal → émission du cristal dans une **large gamme de longueurs d'onde**

2/ éclairage à la **lumière UV** du cristal → émission du cristal de lumière visible par **fluorescence** tant qu'il est irradié à l'UV car **temps de désexcitation très court**

3/ **après éclairage** → émission de lumière par le cristal : **phosphorescence**

2. Électroluminescence et spectres de raies atomiques

On peut exciter les atomes et les molécules par **décharge électrique**, on arrache alors les e^- et on ionise les atomes. Les électrons vont se désexciter et **émettre des photons** : c'est l'**électroluminescence**. On obtient un spectre de raies **spécifique** du gaz en question

3. Absorption et émission : diagramme d'énergie

3 « chemins de désexcitation » :

1/ émission d'un **photon** d'énergie **strictement égale** à l'énergie du photon absorbé, la transition est dite **résonnante**

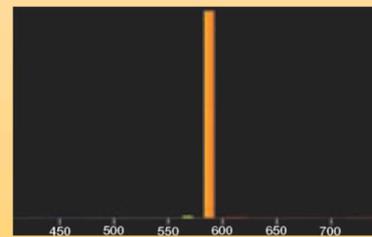
2/ émissions de plusieurs photons passant par des **niveaux énergétiques intermédiaires**

3/ passage par un état métastable par **transition non radiative** i.e. **pas d'échange de photons**, les niveaux sont liés à l'état de vibration des atomes. Il y a un échange d'énergie par **vibration/collision**. Cette transition est observée dans les **solides/liquides**. Après cette transition, il y a un retour à l'**état fondamental** par **émission d'un photon**

Spectres de lampes à sodium :

Basse pression : il y a émission d'une seule raie lumineuse, une seule longueur d'onde

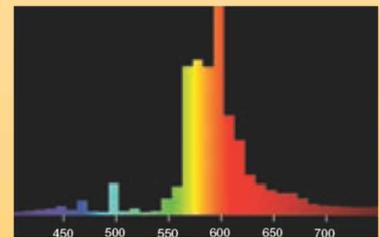
Explication : comme le gaz est à basse pression, la proba de rencontre entre 2 atomes est **quasi nulle**



Haute pression : il y a émission de la raie principale mais également de beaucoup de raies vers le rouge i.e. la longueur d'onde est plus grande

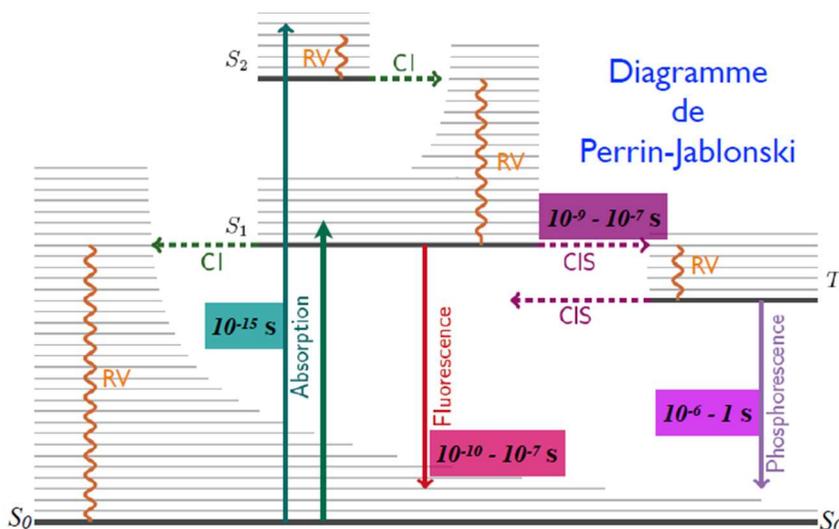
Explication : la proba de rencontre entre 2 atomes est **supérieure** du fait de la haute pression.

Les **transitions** sont **non radiatives par collision vers des états métastables**, ce qui explique la **perte d'énergie** et donc l'augmentation de la longueur d'onde.



4. Luminescence moléculaire : diagramme de Perrin-Jablonski

Molécules = **agencement de plusieurs atomes**. Les niveaux d'énergie ne sont pas uniquement ceux des électrons mais aussi ceux **liés à l'interaction des noyaux entre eux**.



« Légende » du diagramme de Perrin-Jablonski :

- Barres horizontales épaisses : états/niveaux d'énergie électronique : S_0 , S_1 , S_2 et état excité triplet T_1
- Barres horizontales fines : sous-niveaux vibrationnels et rotationnels
- RV = relaxation vibrationnelle

Explication du diagramme :

1/ **Absorption** : du niveau **fondamental** vers un (sous)/niveau **excité**

Il faut que l'énergie du photon $\geq E_{S_1} - E_{S_0}$ pour qu'il y ait absorption

L'absorption est très rapide, de l'ordre du femtoseconde (10^{-15})

2/ **Molécules excités vers les sous niveaux** : **relaxation vibrationnelle** (non radiative) vers le **premier niveau excité** S_1 (en 10^{-12} à 10^{-10}). La radiation vibrationnelle se fait à l'intérieur d'un **ensemble de sous-niveaux** vers le niveau le plus bas

3/ **Niveau le plus bas de S_1 vers fondamental S_0** :

Il existe plusieurs « chemins », ainsi il peut y avoir :

- émission de **fluorescence** via les sous-niveaux vibrationnels. Dans le temps, la fluorescence est observée au bout de **10^{-10} et 10^{-7} s**.

- **désexcitation non radiative**, par la **conversion interne** : c'est un changement d'état **sans changement d'énergie**, c'est le passage d'un atome au niveau d'énergie S_1 vers une énergie d'un sous-niveau de S_0 . La molécule finit ensuite de se désexciter par relaxation vibrationnelle → il n'y **aucun photon d'émis**.

- transition vers un **état intermédiaire T_1** avec **inversion de spin de l'e⁻ promu**, c'est le principe du **croisement inter système (CIS)** : changement du spin d'un e⁻. La CIS est une transition **non radiative**, qui dans le temps est observée entre **10^{-9} et 10^{-7}** .

La durée de vie de T_1 est **beaucoup plus longue** que celle de l'état S_1 .

L'état T_1 représente l'état triplet : 2 électrons de même spin sont dans le même sens, alors que dans l'état singulet on suppose que la somme des spins est nulle

Enfin la désexcitation T_1 vers S_0 se fait par émission de photons : la **phosphorescence** est rendue possible par changement de spin.

NB : les changements de spin ne sont généralement **pas observés à T°C ambiante** mais peuvent l'être dans un **milieu rigide**.

Application : certaines techniques actuelles utilisent la fluorescence, ce sont les **techniques spectro-fluorométriques**.

5. Spectre d'émission et d'absorption

$$\text{Différence d'énergie } T_1 - S_0 < \text{différence } S_2 - S_0 \text{ ou } S_1 - S_0$$

Ainsi λ phosphorescence > λ fluorescence

Les longueurs d'onde d'absorption sont de manière générale inférieures aux longueurs d'onde d'émission. Globalement :

$$\begin{aligned} E_{(abs)} &> E_{(fluo)} > E_{(phospho)} \\ \lambda_{(abs)} &< \lambda_{(fluo)} < \lambda_{(phospho)} \end{aligned}$$

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

6. Le rendement quantique

L'efficacité de luminescence d'une molécule donnée → déterminée par le **rendement quantique φ**

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

Le rendement de certains fluorophores peut être assez élevé, bien que **dépendant également de l'environnement**.

7. La durée de vie

Avec un grand nombre de molécules excitées, toutes ne se dés excitent **pas en même temps**, la décroissance du nombre N de molécules excitées suit une **loi expo** :

$$N = N_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

La durée de vie τ correspond au **temps moyen de séjour des molécules dans l'état excité**. Elle est de l'ordre de 10^{-9} s.

On a aussi le **temps de déclin de fluorescence** τ_f , défini par :

$$\tau_f = \phi_f \cdot \tau_r$$

- τ_r correspondant à la **durée de vie radiative** du **plus bas sous-niveau** de l'état excité
- Le rendement quantique de fluorescence :

$$\phi_f = \frac{\text{nombre de photons de fluo émis}}{\text{nombre de photons absorbés}}$$

NB : la durée de vie de fluo

$\tau_f < \tau_r$ durée de vie radiative

II. L'effet LASER

A. Émission spontanée et émission stimulée (ou induite)

Dans les exemples précédents, les atomes/molécules **se dés excitent spontanément** et l'énergie impliquée dans l'absorption ou l'émission est **exactement égale** à la différence d'énergie entre les 2 niveaux, c'est la **résonance**.

Einstein avait dit : il existe un autre type d'émission, dite **induite/stimulée** : 1 photon incident sur 1 atome **déjà excité** peut **le forcer à se dés exciter** en émettant **un autre photon de caractéristiques identiques à celles du photon incident**. Ainsi, les deux photons **identiques en phase** peuvent à leur tour provoquer **l'émission induite d'un autre photon**, ce qui provoque une **amplification de lumière**. Ce principe est celui du **LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)**

B. Les principes de base du LASER

Pour un laser il faut :

- Un **milieu amplificateur**
- Une **source d'énergie externe** ou **pompage** : il faut apporter de l'énergie aux atomes pour qu'ils soient excités.
- Une **cavité résonnante** : on cherche à ce que les photons de l'émission **rencontrent d'autres atomes** → ils doivent repasser **le + souvent possible** dans le milieu (**ex** : lumière et miroirs)

C. Inversion de population et système à deux niveaux

Dans conditions normales → majorité des atomes sont dans un **état fondamental** mais pour avoir une qtité importante de lumière par **émission stimulée** → bcp d'atomes dans le **même état excité** → **inversion de population**.

- à **0°K** tous les atomes sont dans l'**état fondamental**

- Pour une température supérieure à **0°K**, les atomes peuvent passer **spontanément** dans des niveaux excités par des **échanges thermodynamiques**

Les populations de niveaux sont définies selon la **statistique de Boltzmann** :

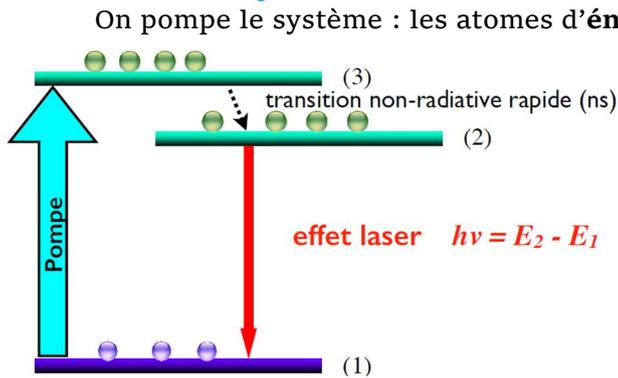
$$N_i \propto e^{\left(\frac{-E_i}{k_B T}\right)}$$

Ainsi plus le niveau est **élevé énergétiquement**, plus sa **population est faible** → les niveaux **les + bas en énergie** sont les plus peuplés.

Pour mettre beaucoup d'atomes dans un **état excité**, il faut forcer l'inversion de populations $N_2 > N_1$. Cette **situation est dite hors équilibre**, c'est le principe du **pompage**. Or pour une transition donnée : la **proba d'émission stimulée = proba d'absorption**, il est impossible d'obtenir une inversion de populations en pompant 1 seule transition atomique, il n'existe donc **pas de laser à 2 niveaux**

$k_B T$ = énergie thermique

D. Système à 3 niveaux



On pompe le système : les atomes d'énergie fondamentale E_1 passent vers le niveau excité E_3 , se dés excitent rapidement de manière **non radiative** vers E_2 (ayant une **durée de vie assez longue**) il y a alors une accumulation à ce niveau, on observe un **effet laser** entre les niveaux 1 et 2.

Laser à rubis de Maiman : il est composé de plusieurs sous-niveaux E_3 , on observe une bande **continue** de niveaux excités E_3 , **très large**, située dans le vert, ce qui permet une absorption grande gamme de photons.

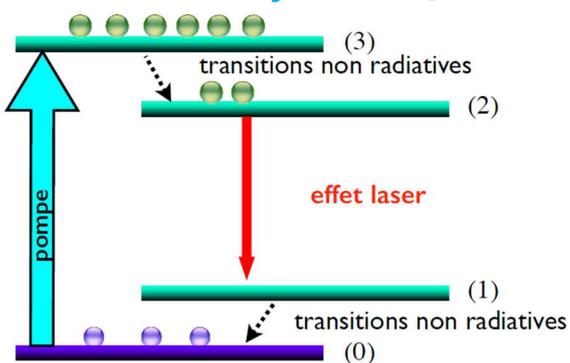
MAIS pas d'émission dans le vert car **aucune émission spontanée** → retour au fondamental par émission dans le rouge.

Avec un **laser à 3 niveaux**, on a : $\Delta N = N_2 - N_1 > 0$

Il faut ainsi pomper suffisamment fort pour qu'il y ait une **transition permanente entre E_1 et E_3** ; c'est le seuil de **seuil de transparence** :

Il faut pomper suffisamment fort pour atteindre au minimum $\Delta N = 0$, i.e. $N_2 = N_1$ et en pompant plus fort que ce seuil $N_2 > N_1$.

E. Système à 4 niveaux



Ces lasers sont **plus efficaces**.

Le niveau 1 n'est pas ici le fondamental → c'est un **niveau excité de basse énergie**, se dés excitant **très rapidement** de manière **NR**.

Ainsi, étant donné que **durée de vie de E_1 très courte** et que **durée de vie de E_2 longue** → **inversion de pop facile entre ces niveaux**.

Ainsi il n'y a pas de seuil de transparence dans laser à 4 niveaux.

Dans certains cas, le niveau 1 se trouve aussi dans **une bande large** ; l'effet laser se fera donc d'un niveau E_2 vers un **ensemble de niveau E_1** , il y a une possibilité de choisir un certain niveau E_1 à l'intérieur de cette bande. On peut donc choisir la fréquence amplifiée $h\nu = E_2 - E_1$ sur un certain intervalle, ce choix de la fréquence du photon émis permet d'avoir un **laser accordable en fréquence**.

F. Le rôle de la cavité

Elle doit **empêcher la sortie immédiate des photons** et doit permettre aux photons de traverser **plusieurs fois** le milieu amplificateur.

Cas le + simple : cavité de Fabry-Perrot, composée de 2 miroirs plans parallèles

1. Condition de résonance

Une cavité formée de **2 miroirs plans parallèles** est l'analogie optique d'une **corde vibrante fixée à ses deux extrémités**.

La **réflexion des OEM** est analogue à la réflexion des ondes longitudinales, on a apparition de **modes longitudinaux** : seules **certaines λ** pourront exister.

Condition de résonance : les aller-retour entre les 2 miroirs doivent être des **multiples entiers** de la longueur d'onde, i.e.

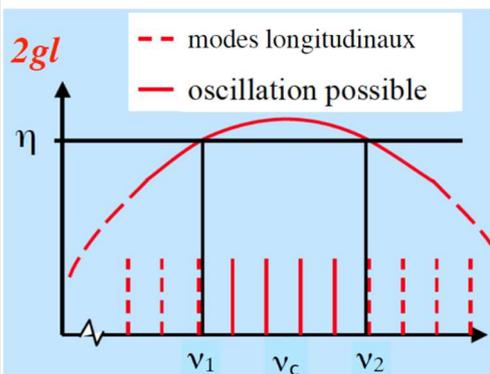
$$2L = n\lambda = \frac{nc}{2L} = nv_0$$

NB : la fréquence fondamentale ν_0 est la **différence des fréquences de 2 résonances voisines**

$$\nu_0 = \frac{c}{2L}$$

2. Condition d'oscillation

Il y a une **perte de photons** dans la cavité, due à plusieurs raisons (*absorption, départ de la cavité...*) et il faut que la cavité laisse passer des photons par 1 des miroirs.



Le fonctionnement du laser suppose que les **pertes dues à l'absorption soient au moins compensées par l'amplification laser**, caractérisée par le gain du milieu actif G et par les pertes η sur un **aller-retour**.

Condition d'oscillation laser :

$$G(1 - \eta) > 1$$

On peut aussi écrire : $G = e^{2gl}$ → **plus la cavité est longue, plus le gain est exponentiellement grand.**

On a aussi :

$$g \propto (N_2 - N_1) \cdot f(\nu)$$

Le gain est donc **proportionnel à l'inversion de population** et à une fonction qui dépend de la fréquence du photon. Il se représente par une **courbe en cloche**

3. Approximation des gains faibles

Si $g \ll 1$ « reste petit devant l'unité », alors $G \approx 1 + 2gl$ (par simplification).

Si η aussi est petit devant 1 → **condition d'oscillation** : $2gl < \eta$

Ainsi pour respecter cette condition, on peut :

- **diminuer les pertes** le plus possible
- **augmenter g** , i.e. très forte inversion de pop.
- **augmenter l** , i.e. augmenter longueur du milieu actif

« Légende » :

- courbe en cloche : $2gl$

- droite horizontale : pertes η

- « bâtons verticaux » : fréquences de résonance de la cavité, multiples de ν_0

On observe un **court intervalle** où la condition de résonance est respectée, il y a seulement quelques fréquences multiples de ν_0 dans cet intervalle. Ainsi seulement **quelques fréquences très proches entre elles** peuvent être amplifiées par le laser

NB : la différence entre 2 fréquences de résonance est **généralement plus petite que l'intervalle** sur lequel l'oscillation est possible

Plusieurs modes longitudinaux peuvent coexister → **laser à plusieurs modes**

4. Modes transverses

Les **variations transverses** sont liées à la **section finie de la cavité** et se traduisent par des **modes transverses**, elles sont analogues aux modes de vibration de la membrane d'un tambour, caractérisés par leur **profil spatial**

Le 1^{er} mode transverse est celui dont les **pertes par diffraction sur les bords des miroirs** sont les + **faibles** car la lumière est **concentrée au centre de la cavité**, c'est le meilleur mode laser car **cohérence spatiale** assurant la **directivité du faisceau**

Diapo : ce mode est caractérisé par une forte corrélation de l'amplitude et de la phase des ondes dans une section transverse du faisceau

Si on a un seul mode longitudinal excité et ce dans le 1^{er} mode transverse, on a alors une **cohérence temporelle + spatiale**

NB : pour rendre **négligeables les pertes par diffraction**, il faut que $\lambda \cdot l \ll a^2$

On peut ainsi utiliser par exemple un **miroir concave** qui refocalise les photons sur le miroir plan.

G. Les différents types de LASER

	Lasers solides			Lasers à gaz	Lasers semi-conducteurs ou diodes laser			Laser à colorant
Composition	Rubis de Maiman	À néodyme	Titane-saphir	Hélium-Néon	Jonctions de semi-conducteur + milieu amplificateur entre			Molécules organiques fluo dans des solvants
Fonctionnement	Laser à 3 lvl Pompage par tube flash	Laser à 4 lvl Milieu actif : verre	Pompage optique par un autre laser vert à base de néodyme	Alimentation élec. → énergie aux atomes d'He → transfert par collision aux atomes de Ne	Transitions laser → entre bandes de niveaux Émission de lumière : entre lvl bande de conduction et lvl bande de valence			Pompage optique car molécules de colorant dilués → incapables de conduire correctement le courant élec.
Longueur d'onde émise (en nm)	694,3	1,06.10 ³	680 à 1100	543 à 643	GaAs : 840	AlGaAs : 760	GaInAsP : 1300	« Intéressantes », accordables sur une large gamme
Remarques		Existence de bandes de niveaux permettant d'être accordable	Cristaux non-linéaires doubleurs de fréquence → accordable Laser sophistiqués et chers		Les + faciles à fabriquer → les + couramment utilisés dans la vie de tous les jours Peu directionnels			Très peu utilisés, surtout dans la recherche S'usent très rapidement : photo-dégradation