

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

**Incandescence** : lumière d'origine **thermique** (d'un corps à une température non nulle), on observe alors un **spectre continu** de REM (**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)

**II. La luminescence**

Quand les effets thermiques sont **négligeables**, on aura une « **lumière froide** »  
On apporte de l'énergie (autre que thermique) à la matière, qui va exciter les atomes

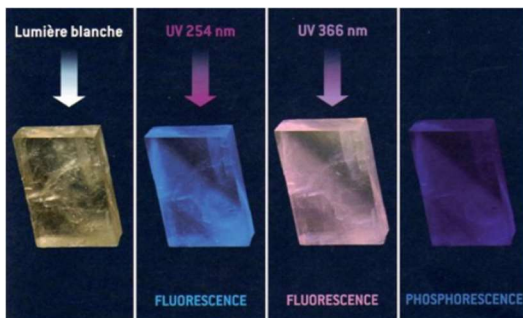
→ **Luminescence**, on observe différents types de luminescence en fonction de la source d'énergie apportée.

Il y a un retour du système vers l'**état fondamental** par **émission de photons** (suivant plusieurs phénomènes que l'on va décrire ensuite).

**A. Fluorescence et phosphorescence**

**Phosphorescence** : les éléments excités passent par un état intermédiaire, dit **métastable**.

La principale différence entre le phénomène de **fluorescence** et celui de **phosphorescence** est leur **déclin** : **plus rapide** ( $10^{-9}$  s) pour la **fluorescence** que pour 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**

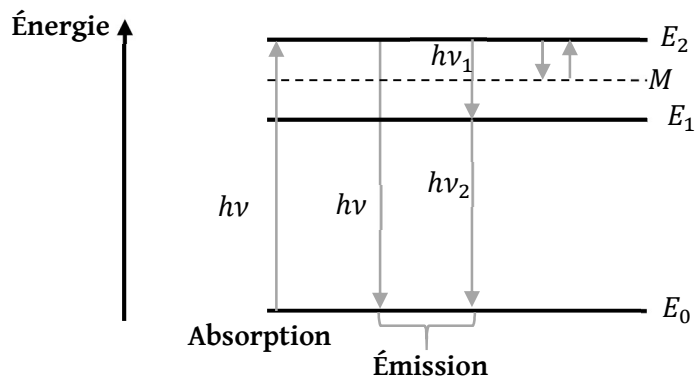
3/ **après éclairage** → émission de lumière par le cristal : **phosphorescence**

**B. Luminescence atomique**

On peut exciter les atomes et les molécules par **décharge électrique**, on excite (ou ionise) alors 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 « chemins de désexcitation » :**

- ❖ émission d'un **photon** d'énergie **strictement égale** à l'énergie du photon absorbé, la transition est dite **résonnante**
- ❖ émissions de plusieurs photons passant par des **niveaux énergétiques intermédiaires**

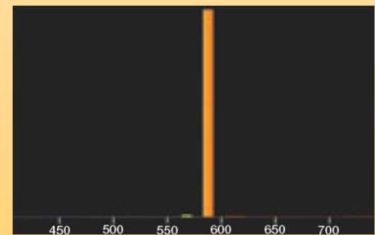


❖ passage par un état métastable par **transition non radiative** i.e. **pas d'échange de photons**, les niveaux sont liés à l'état de vibration des atomes. Il y a un échange d'énergie par **vibration/collision**. Cette transition est observée dans les **solides/liquides**. Après cette transition, il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

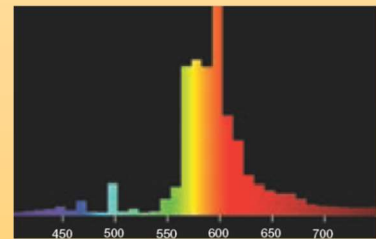
**Explication** : comme le gaz est à basse pression, la proba de rencontre entre 2 atomes est **quasi nulle**



**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.

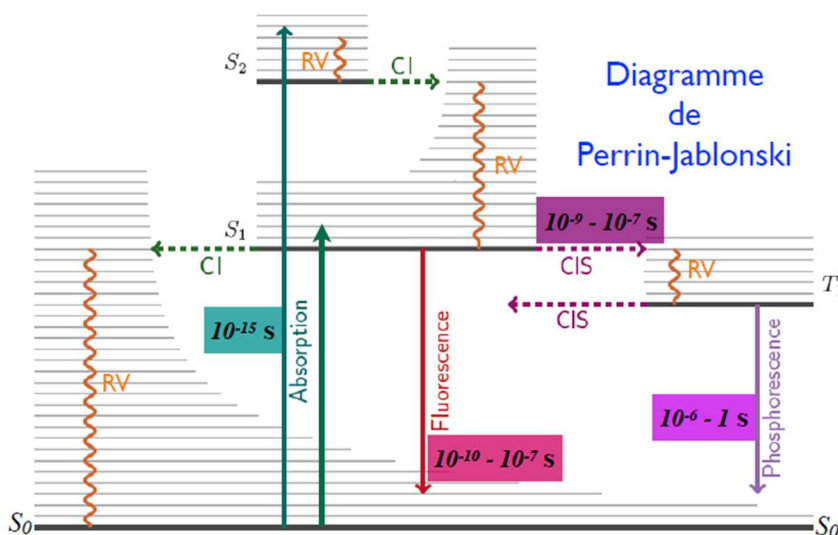
Les **transitions** sont **non radiatives par collision vers des états métastables**, ce qui explique la **perte d'énergie** et donc l'augmentation de la longueur d'onde.



### C. Luminescence moléculaire

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

#### 1. Diagramme de Perrin-Jablonski



« 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 :**

Si l'on envoie des **photons** sur des molécules (dont l'énergie est schématisée sur le diagramme), celles-ci pourront les **absorber** (à condition que **l'énergie du photon soit égale à une différence entre 2 niveaux d'énergie**).

Le système va ensuite se **désexciter** (car tous les niveaux excités ont une durée de vie finie). On va ainsi observer **plusieurs schémas de désexcitation** :

**a. Transitions non radiatives**

- **Relaxation vibrationnelle ( $10^{-13} - 10^{-11}s$ )**: passage d'un **sous-niveau vibrationnel** au **plus bas niveau vibrationnel d'un même niveau**
- **Conversion interne** : Passage du **plus bas niveau vibrationnel d'un niveau excité** donné à un **niveau vibrationnel d'énergie équivalente du niveau d'énergie inférieur**. On pourra ensuite observer une transition de ce niveau vibrationnel vers le niveau le plus bas de ce même niveau, par **relaxation vibrationnelle**.  
➤ On passera d'un **niveau excité** à un **niveau d'énergie inférieur SANS émission de photons**.

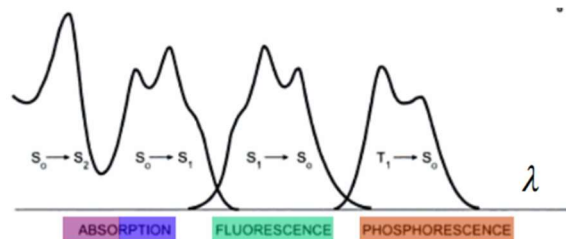
*NB : La transition se fait alors par réarrangements, vibrations et échanges d'énergies entre les molécules*

- **Croisement (conversion) intersystème** : Cette transition est liée au **spin** des électrons d'une molécule. En effet, des niveaux électroniques (d'une molécule) avec des **états de spin différents** vont conduire à des **niveaux d'énergie différents**.

**b. Transitions radiatives**

- **Fluorescence ( $10^{-12} - 10^{-7}s$ )** : Passage d'un **niveau excité** à un **niveau d'énergie inférieure** par **émission de photon d'énergie égale à la différence d'énergie entre les 2 niveaux**
- **Phosphorescence ( $10^{-6} - 10^4s$ )** : Passage d'un **niveau excité, triplet** vers le **niveau d'énergie inférieure**. Les niveaux triplets ayant beaucoup de mal à se désexciter les atomes vont rester longtemps dans cet état triplet, ce qui explique sa durée de vie. Ce phénomène peut être la conséquence du phénomène de CIS.

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



$$E_{(abs)} > E_{(fluo)} > E_{(phospho)}$$

$$\lambda_{(abs)} < \lambda_{(fluo)} < \lambda_{(phospho)}$$

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

## 2. Le rendement quantique

Il est défini par le rapport du nombre de **photons émis** et le nombre de **photons absorbés** par la molécule, i.e. :

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

On peut également définir le **rendement quantique de fluorescence**, caractérisant l'**efficacité de la fluorescence d'une molécule donnée**. Il est défini par le **rapport** du nombre de photons **de fluorescence émis** et le nombre de photons **absorbés** par la molécule, i.e.

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

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

## 3. 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  $\tau$  correspond au **temps moyen de séjour des molécules dans l'état excité**. Elle est de l'ordre de  $10^{-9}$  s.

## 4. Temps de déclin

C'est une notion liée au **rendement quantique**.

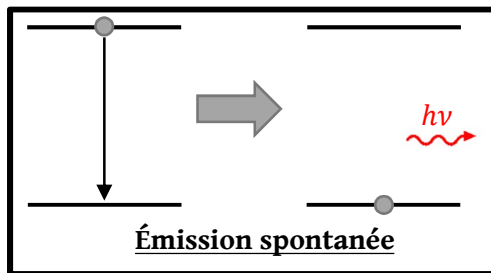
Le temps de déclin **de fluorescence** fait intervenir le rendement quantique **de fluorescence** et la **durée de vie radiative** du plus bas sous-niveau de l'état excité (le niveau  $S_1$ ), selon la relation :

$$\tau_f = \varphi_f \cdot \tau_r$$

Ce temps de déclin de fluorescence nous renseignera sur la **persistance de la fluorescence** après arrêt de l'excitation de la molécule en question.

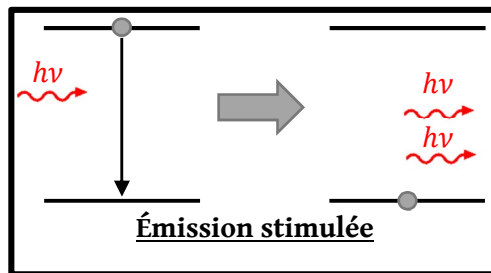
## Effet LASER

### I. Émission spontanée et émission stimulée (ou induite)



#### Émission spontanée

Dans les exemples précédents, les atomes/molécules **se désexcitent 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 **résonnance**.



#### Émission stimulée = induite

Un photon incident sur 1 atome **déjà excité** peut le **forcer à se désexciter** 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)**

### II. 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** : permettant de « piéger » la lumière, de sorte qu'elle **passse très souvent** dans le milieu amplificateur pour assurer le **phénomène d'amplification**

#### A. Inversion de population et système à deux niveaux

En conditions normales, la majorité des atomes sont dans un **état fondamental** mais pour avoir une amplification de lumière par **émission stimulée** il faut que beaucoup d'atomes dans le **même état excité**, c'est là qu'intervient l'**inversion de population**.

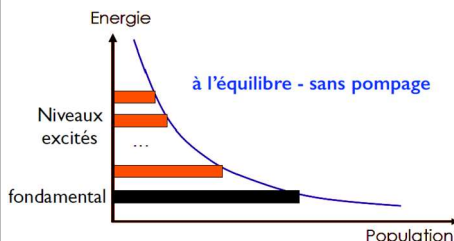
##### 1. Situation sans pompage = équilibre thermodynamique

Pour un grand nombre d'atomes, à l'**équilibre thermodynamique** (pour une température donnée), les **niveaux d'énergie** sont régis par la **statistique de Boltzmann** :

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

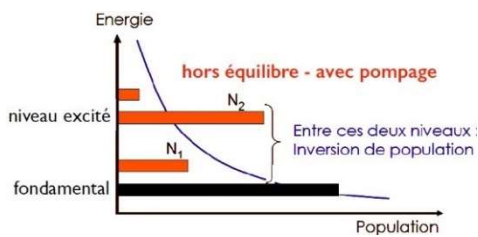
#### Point unités

- $E_i$  = niveau d'énergie
- $k_B$  = constante de Boltzmann
- $k_B T$  = énergie thermique



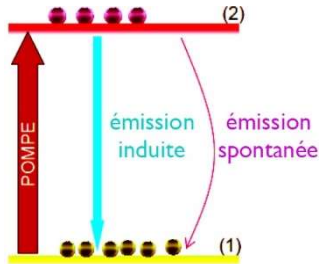
Cette formule nous indique que plus le niveau d'énergie est **élevé** ( $E_i$ ), plus le nombre d'atomes dans ce niveau d'énergie est **petit** ; l'inversion de population est donc **impossible** à l'**équilibre thermodynamique**.

## 2. Situation avec pompage = hors équilibre



Cette situation est obtenue grâce à une **puissante source d'énergie (= pompage)**, qui va engendrer (et maintenir) un nombre d'atomes, dans un niveau d'énergie excité donné, **plus élevé** que le nombre d'atomes prévu par la loi de Boltzmann.

➤ Il peut y avoir cette fois-ci une **inversion de population**

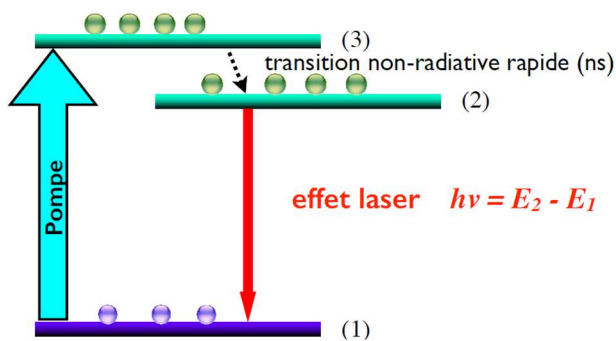


Pour une transition donnée, la **probabilité d'émission stimulée** est **égale** à celle de l'absorption, il est **impossible** d'obtenir un effet LASER en ne pompant **qu'une seule transition atomique** (d'où la nécessité d'obtenir une inversion de population)

**Il n'existe donc pas de LASER à 2 niveaux** ++++++

### B. Système à 3 niveaux

On pompe le système : les atomes d'énergie fondamentale  $E_1$  passent vers le niveau excité  $E_3$ , se désexcitent 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 (par l'inversion de population).



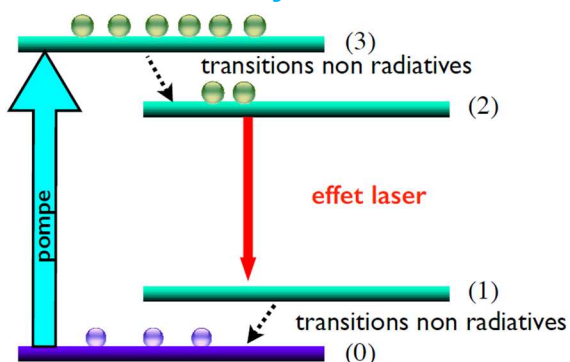
Avec un **laser à 3 niveaux**, on a :  $\Delta N = N_2 - N_1 > 0$   
Il faut ainsi pomper suffisamment fort pour qu'il y ait une **transition permanente entre  $E_1$  et  $E_3$**  ; c'est le **seuil de transparence** :

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  $N_2 > N_1$ .

**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 l'absorption d'une grande gamme de photons.

### C. 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 désexcitant **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**.

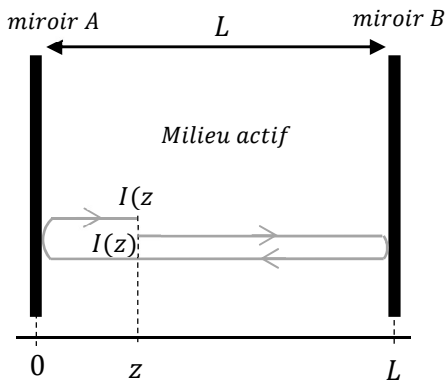


### D. Le rôle de la cavité

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-Perot, composée de 2 miroirs plans parallèles

#### 1. Condition de résonance



Une cavité formée de **2 miroirs plans parallèles** est l'analogue 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  $\lambda$**  pourront exister.

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

$$2L = n\lambda \Leftrightarrow \nu = \frac{nc}{2L} = n\nu_0$$

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

**NB** : la fréquence fondamentale  $\nu_0$  est la **différence des fréquences de 2 résonances voisines**

#### 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  $\eta$  sur un **aller-retour**.

Condition d'oscillation laser :

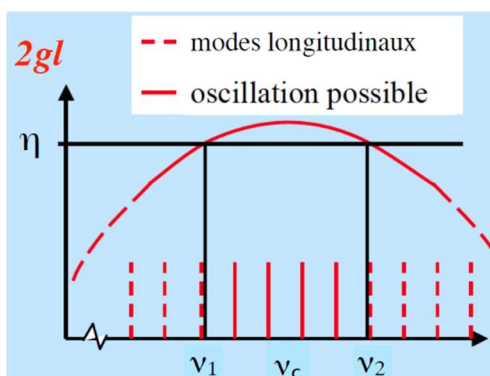
$$G(1 - \eta) > 1$$

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

#### Point unités

- $G$  = gain du milieu actif
- $L$  = longueur de la cavité
- $l$  = longueur du milieu actif

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

Si  $\eta$  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 » :

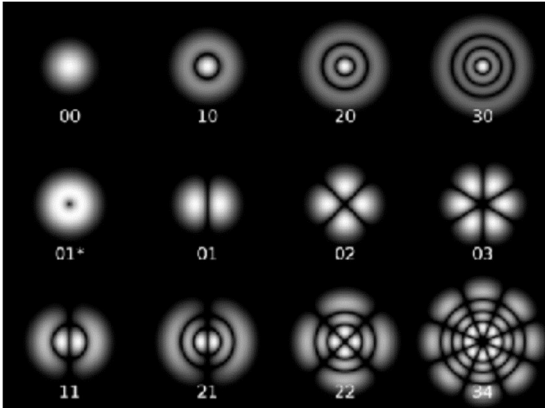
- courbe en cloche :  $2gl$
- droite horizontale : pertes  $\eta$
- « bâtons verticaux » : fréquences de résonance de la cavité, multiples de  $\nu_0$

On observe un **court intervalle** où la condition de résonance est respectée, il y a seulement quelques fréquences multiples de  $\nu_0$  dans cet intervalle. Ainsi seulement **quelques fréquences très proches entre elles** peuvent être amplifiées par le laser

Pour la méthode pour trouver le nombre de modes actifs, je vous renvoie à la vidéo postée sur la chaîne YouTube du Tutorat Niçois, où c'est expliqué en détail 😊

#### 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**



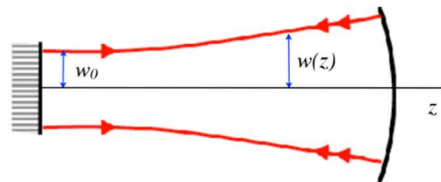
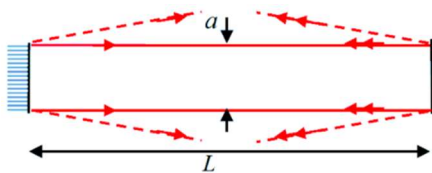
Le 1<sup>er</sup> mode transverse est celui dont les **pertes par diffraction sur les bords des miroirs** sont les + **faibles** car la lumière est **concentrée au centre de la cavité**, c'est le meilleur mode laser car **cohérence spatiale** assurant la **directivité du faisceau**  
**Diapo** : ce mode 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<sup>er</sup> mode transverse, on a alors une **cohérence temporelle + spatiale**

##### Légende de l'image :

- Le premier chiffre indique le nombre de « cercles noirs »
- Le deuxième chiffre indique le nombre de diamètre où la lumière s'annule

**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.





### E. Les différents types de LASER

	Lasers solides			Lasers à gaz	Lasers semi-conducteurs ou diodes laser			Laser à colorant
<b>Composition</b>	Rubis de Maiman	À néodyme	Titane-saphir	Hélium-Néon	Jonctions de semi-conducteur + milieu amplificateur entre			Molécules organiques fluo dans des solvants
<b>Fonctionnement</b>	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.
<b>Longueur d'onde émise (en nm)</b>	694,3 (rouge)	$1,06 \cdot 10^3$ (proche IR)	680 à 1100 (de l'UV à l'IR grâce aux cristaux)	543 à 643	GaAs : 840	AlGaAs : 760	GaInAsP : 1300	« Intéressantes », accordables sur une large gamme
<b>Remarques</b>		Existence de bandes de niveaux permettant d'être accordable	Cristaux non-linéaires doubleurs de fréquence → accordable Laser sophistiqués et chers Peut fonctionner en impulsionnel	15% Hélium, et 85% Néon	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