

PHYSIQUE – Cours 2

UE3a

ORGANISATION DES APPAREILS ET DES SYSTÈMES : BASES PHYSIQUES DES MÉTHODES D'EXPLORATION - ASPECTS FONCTIONNELS

Optique

Emission de la lumière
par la matière

Plan du cours

I. Incandescence et luminescence -
Phosphorescence et fluorescence

II. Emission spontanée / Emission stimulée -
Effet laser

III. Cavité résonnante

IV. Divers types de lasers

I. Incandescence et luminescence - Phosphorescence et fluorescence

Incandescence

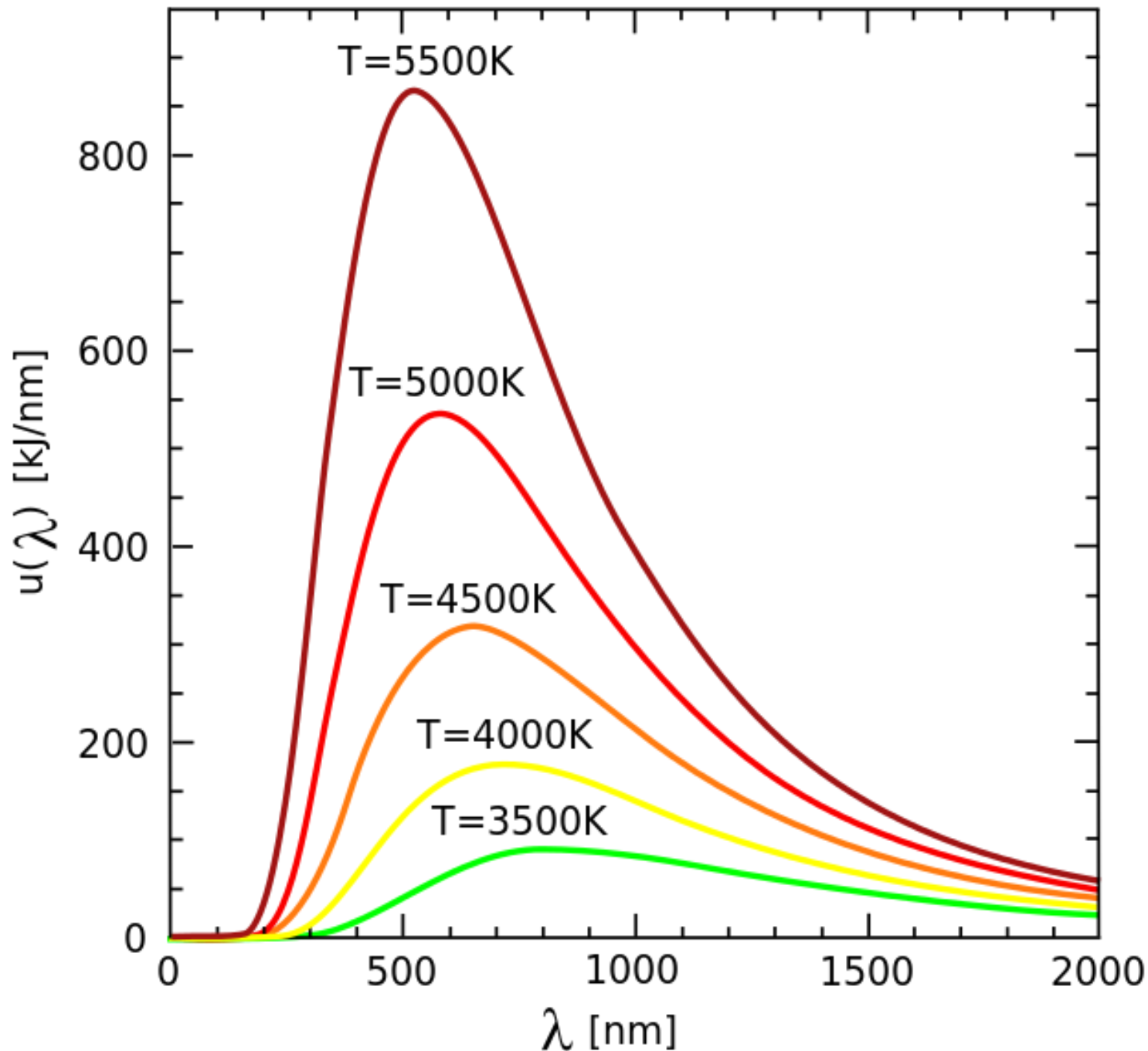
Phénomène qui se produit quand un corps porté à une température élevée devient chaud et émet une lumière d'origine **thermique**.

Exemples : La lumière du soleil ou celle d'une bougie.



Un corps chauffé à une température T rayonne et émet **un spectre continu** de rayonnement électromagnétique : c'est le spectre de **corps noir**.

Ce spectre possède aussi un **maximum**.



La longueur d'onde maximale du spectre est donnée par la formule :

$$\lambda_{max} T \cong 0,29 \text{ cm. K}$$

Ce produit est **constant**.

La puissance émise par unité de surface augmente avec la température, impliquant des longueurs d'onde de plus en plus faibles.

QCM

Sachant que la température du Soleil est à 6000 K, approximativement pour quelle longueur d'onde exprimée en nm le Soleil présente-t-il son maximum d'émission ?

A) 0,01 B) 16 C) 480 D) 5200 E) 10^5

Correction

Rappel : $\lambda_{max} T \cong 0,29 \text{ cm. K}$

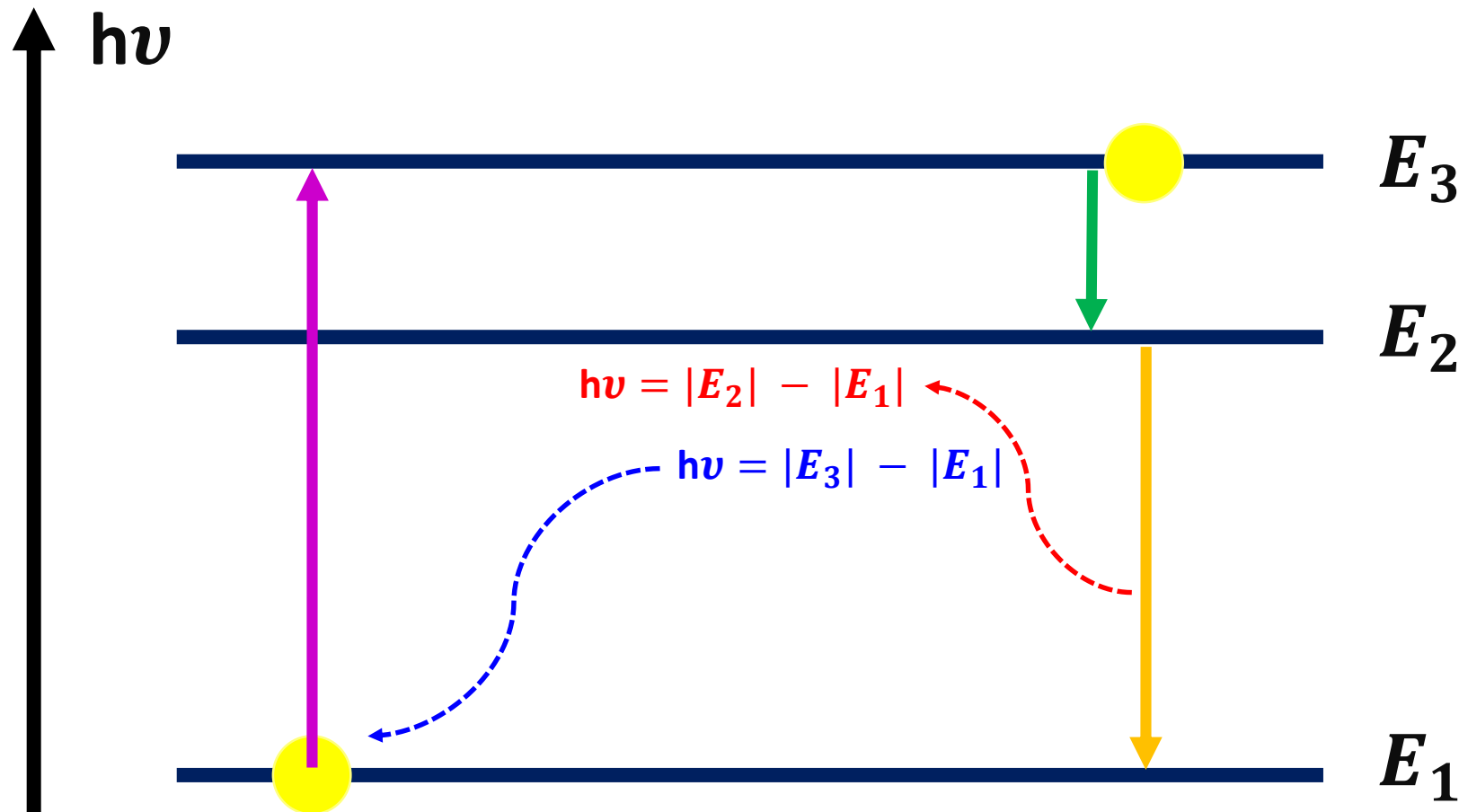
$T = 6000 \text{ K}$, donc en remplaçant dans la formule on a :

$$\lambda_{max} \times 6000 = 0,29 \text{ cm. K}$$

D'où $\lambda_{max} = \frac{0,29}{6000} = 0.000048 \text{ cm}$ soit **480 nm**, donc la bonne réponse est la réponse C.

Note : Le corps humain (300 K) a son maximum d'émission vers $\lambda = 10 \mu\text{m}$.

Luminescence



Note : Le phénomène de luminescence est l'origine d'une lumière dite **froide** contrairement à l'incandescence.

La luminescence est le phénomène consécutif à un apport d'énergie amenant atomes ou molécules dans un **état excité**.

Le retour de ces éléments vers leur **état fondamental** s'accompagne de l'émission de photons.

L'excitation n'est pas forcément produite par l'absorption d'un photon !

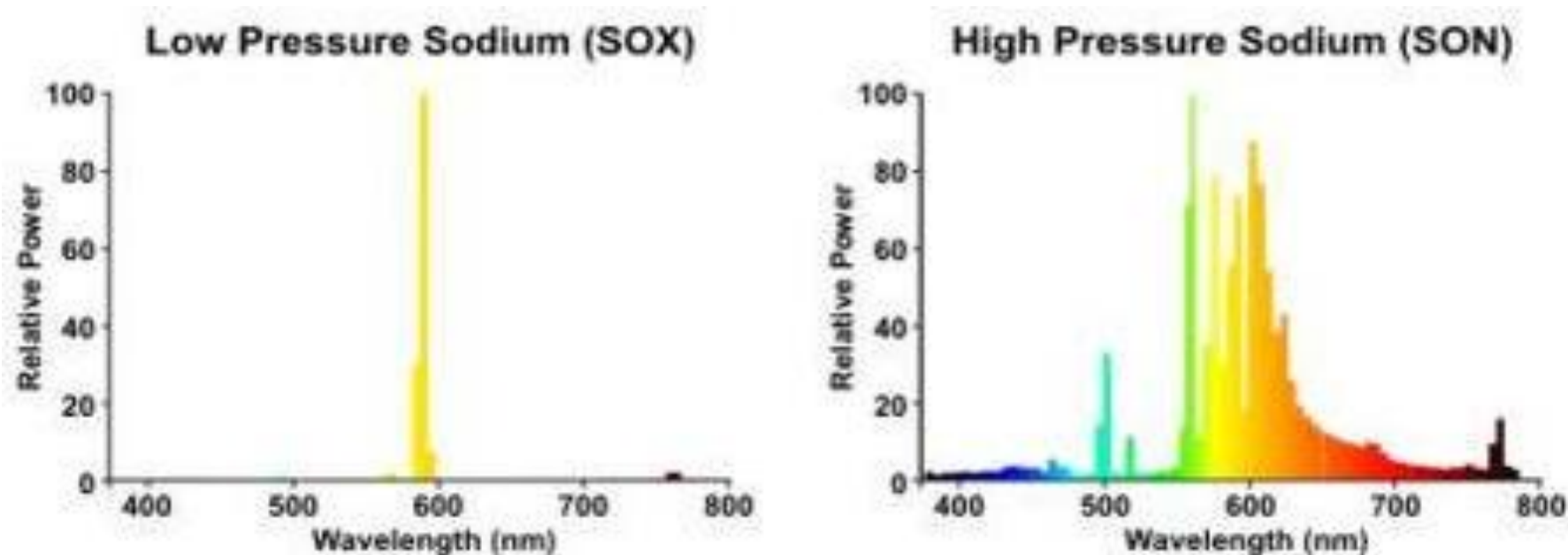
Selon **la cause** de l'excitation on définit différents types de luminescence.

The image shows ten spools of electroluminescent (EL) wire arranged in two rows of five. The top row features spools of green, white, blue, cyan, and yellow. The bottom row features spools of red, teal, magenta, orange, and pink. Each spool is a black plastic reel with the wire wound tightly around it. The wires are all glowing with a bright, uniform light. Some loose lengths of the colored wires are visible on the surface in front of the spools. The background is dark, and the overall scene is dimly lit, with the primary light source being the glowing wires themselves. In the background, some faint text like 'WANYU' and 'AC POWER' can be seen on a dark surface.

Electroluminescence

Exemple de l'électroluminescence dans une **lampe à décharge**

C'est un tube rempli de gaz sur lequel on applique des décharges électriques arrachant les électrons qui vont percuter et exciter les atomes. Ces derniers en revenant à l'état fondamental vont émettre des photons !



Plus la pression dans le tube augmente, plus le nombre de chocs augmente. Il y a alors excitations sur plusieurs niveaux d'énergies différents, induisant un élargissement du spectre (spectre de droite).

The background of the image shows several mineral specimens against a black background. On the left, there is a cluster of minerals that glow with a vibrant blue light. On the right, there is a larger, more crystalline specimen that glows with a bright red light. The word 'Photoluminescence' is centered over the image in a multi-colored font.

Photoluminescence

An X-ray image of two human hands, palms facing each other, with the word "Radioluminescence" overlaid in the center. The bones of the hands and wrists are clearly visible against a dark background.

Radioluminescence

Cathodoluminescence



Chimiluminescence

Bioluminescence



Mode d'excitation	Types de luminescence
Champ électrique	Electroluminescence
Lumière	Photoluminescence
Rayons X, rayonnements α , β , γ	Radioluminescence
Electrons accélérés	Cathodoluminescence
Réactions chimiques	Chimiluminescence
Réactions biochimiques	Bioluminescence

La photoluminescence se décline en deux catégories :

Fluorescence

Phénomène de luminescence très rapide (de l'ordre de quelques nanosecondes) qui s'estompe à l'arrêt de l'éclairement. La couleur varie avec la longueur d'onde d'excitation.

Phosphorescence

Phénomène voisin de la fluorescence pour lequel on a arrêté l'éclairement. La matière va toutefois continuer de produire de la lumière, on parle alors de phosphorescence.

Retenir : Le déclin de la fluorescence est généralement plus rapide que celui de la phosphorescence.

Lumière blanche



UV 254 nm



FLUORESCENCE

UV 366 nm



FLUORESCENCE

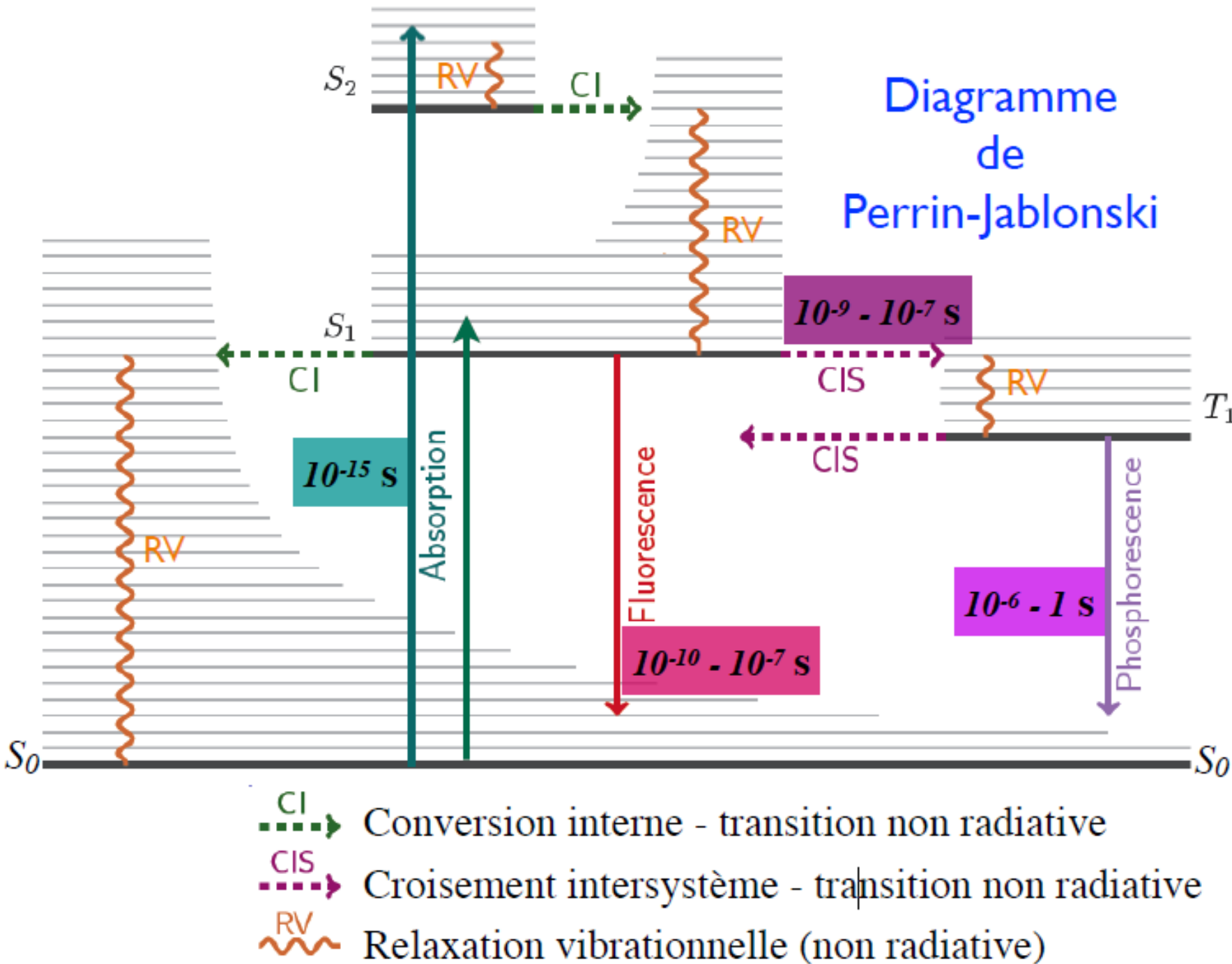


PHOSPHORESCENCE

Luminescence moléculaire

Comme pour les atomes, les électrons d'une molécule peuvent transiter vers des niveaux d'énergie supérieure si la molécule absorbe de l'énergie.

Dans une molécule ces niveaux électroniques présentent **des sous-niveaux vibrationnels et rotationnels.**



Après absorption d'un photon, les molécules excitées relaxent vers le plus bas niveau vibrationnel du **1^{er} état excité S_1** .

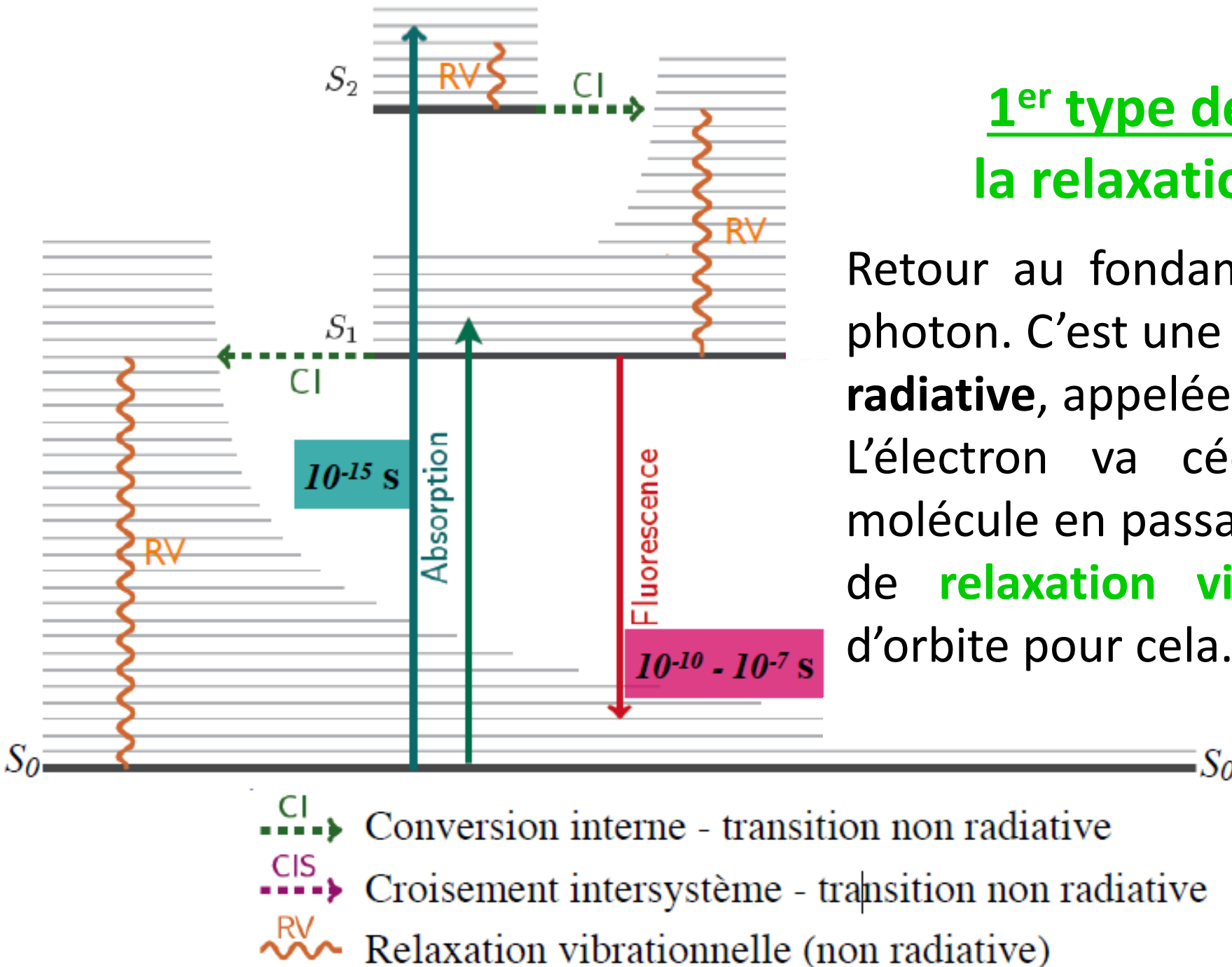
Il n'y a pas d'émission de photons (non radiatif).

Puis, après un certain temps, **durée de vie τ de l'état excité S_1** , on distingue trois types de désexcitation.

1^{er} type de désexcitation : la relaxation vibrationnelle

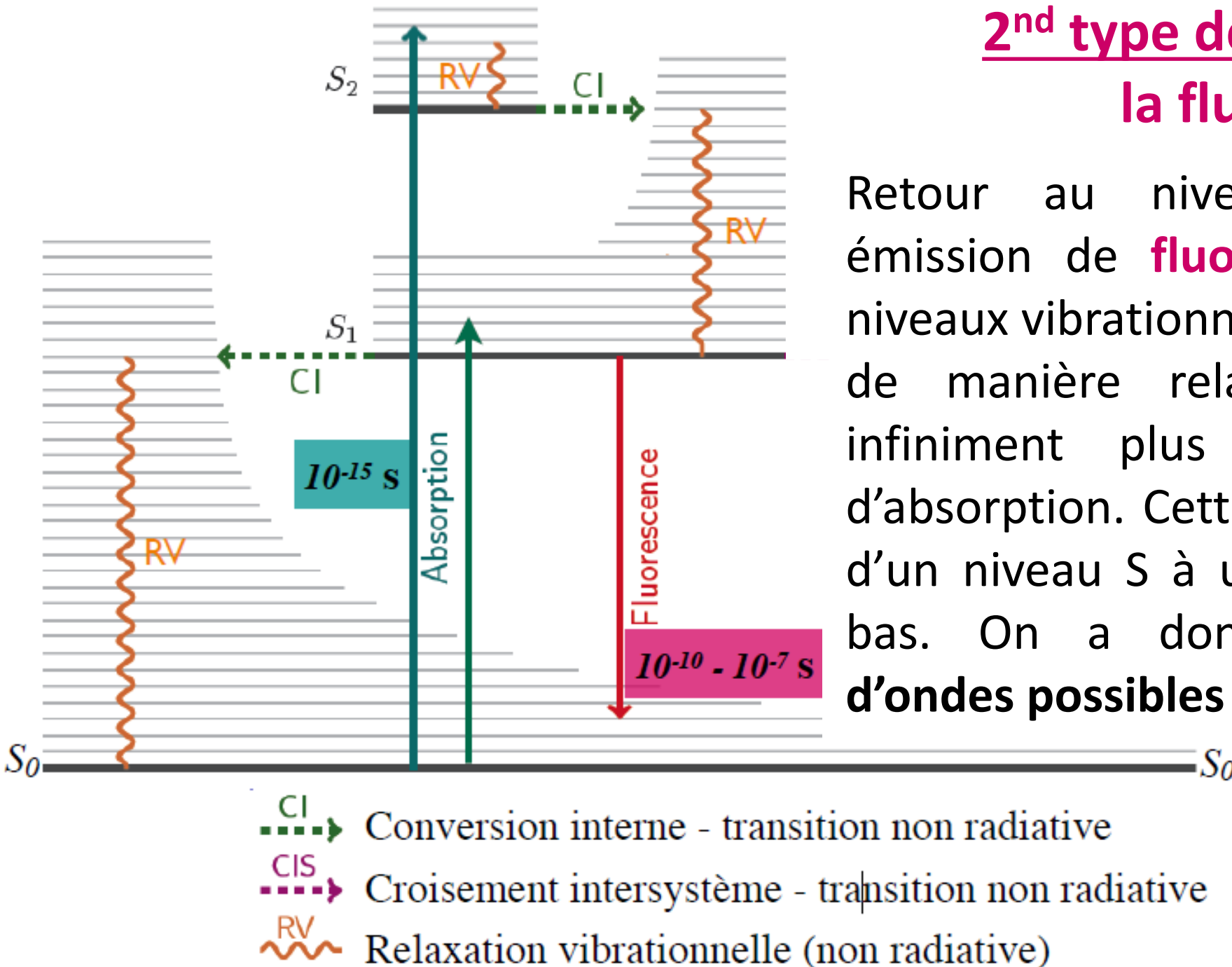
Retour au fondamental sans émission de photon. C'est une désexcitation qui est **non radiative**, appelée **conversion interne**.

L'électron va céder son énergie à la molécule en passant de S_1 à S_0 sous forme de **relaxation vibrationnelle**, il change d'orbite pour cela.



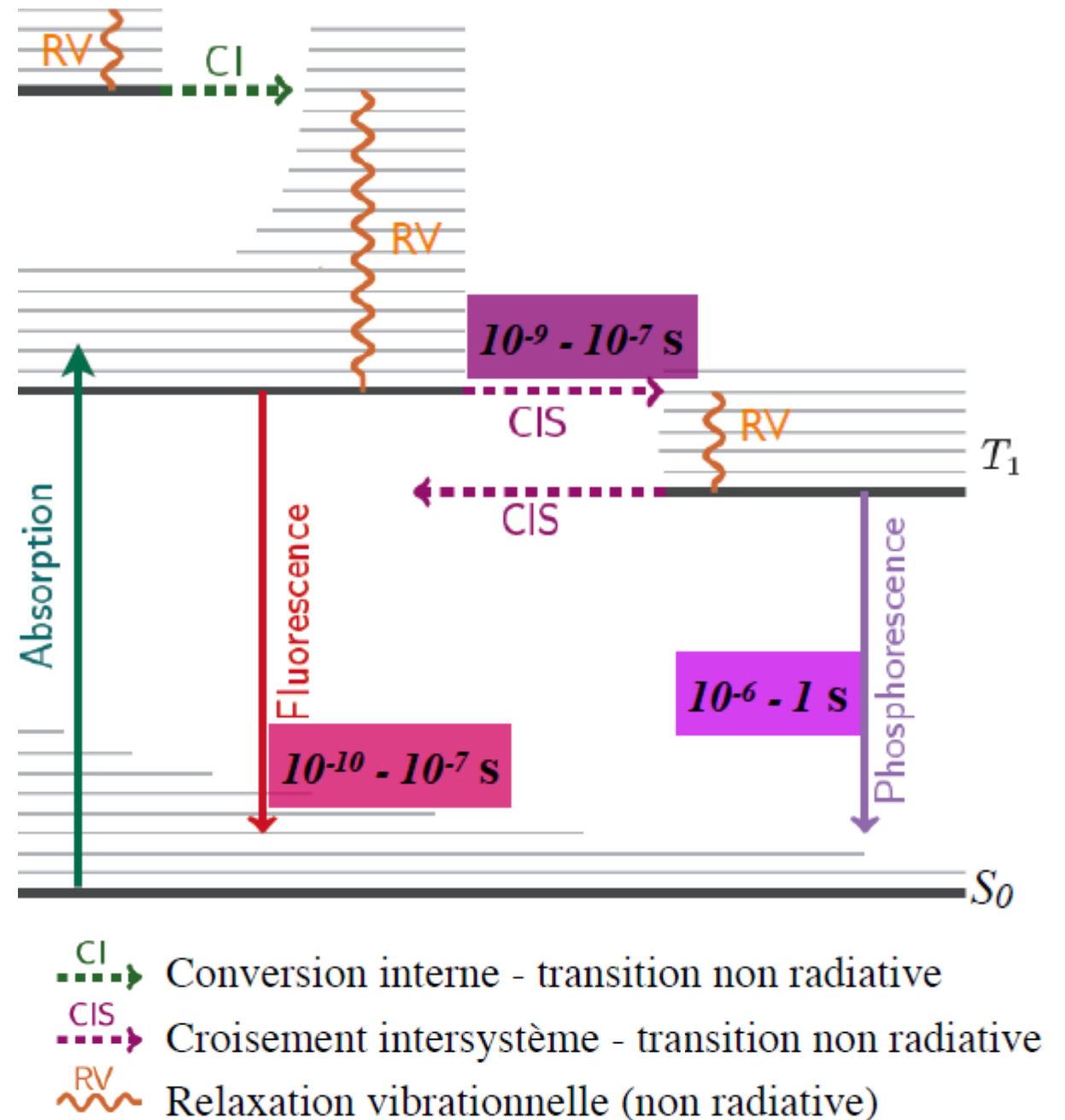
2nd type de désexcitation : la fluorescence

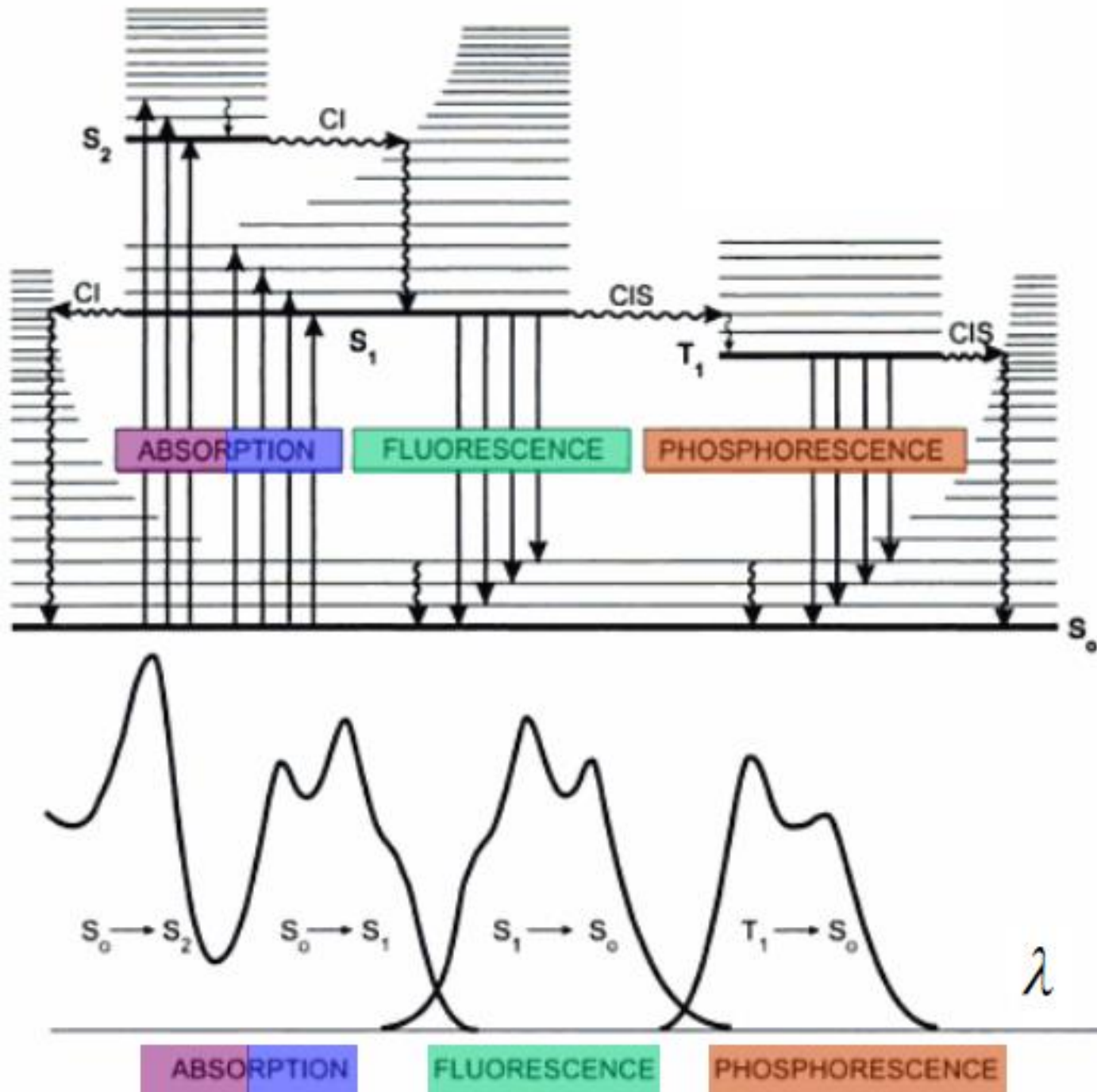
Retour au niveau fondamental avec émission de **fluorescence** via les divers niveaux vibrationnels de l'état fondamental de manière relativement rapide mais infiniment plus long que le temps d'absorption. Cette transition peut se faire d'un niveau S à un état vibrationnel plus bas. On a donc **plusieurs longueurs d'ondes possibles pour le photon émis.**



3^e type de désexcitation : la phosphorescence

Retour à l'état fondamentale par transition vers un autre état excité intermédiaire T_1 . Ce phénomène s'appelle **croisement intersystème**. La durée de vie de l'état T_1 est en principe beaucoup plus longue que celle de l'état S_1 (quelques μs à plusieurs heures). L'état T_1 précède la **phosphorescence**.





Le spectre de **phosphorescence** correspond à des longueurs d'onde plus grandes que celles du spectre de **fluorescence** parce que le plus bas niveau vibrationnel de l'état T_1 est au-dessous de celui de S_1 .

Rappel :

Ce qui distingue un photon de **fluorescence** et un photon de **phosphorescence** c'est le temps de production après excitation !

Les techniques modernes utilisant la fluorescence (**spectro-fluorimétrie**) sont exploitées dans de nombreux domaines.

Les molécules utilisés sont appelés **fluorophores**.

Quels paramètres sont utilisés pour les décrire?

a) Le rendement quantique

b) La durée de vie

a) Le rendement quantique

L'efficacité de fluorescence pour une molécule donnée est déterminée par le **rendement quantique ϕ_f** . Il est défini par le rapport entre le nombre de photons émis et le nombre de photons absorbés par la molécule.

Le rendement quantique varie en fonction de l'environnement des **fluorophores**.

Exemple : $\phi = 0,85$ pour la **fluorescéine**

b) La durée de vie

Le nombre de molécule totale N qui reste excité en fonction du temps décroît **exponentiellement**, caractérisé par **un temps de déclin τ_r de fluorescence** appelé **durée de vie de l'état excité**, temps que les molécules dans le niveau S_1 se désexcitent vers le niveau S_0 .

C'est donc le **temps moyen** de séjour des molécules dans l'état excité.

Si on regarde uniquement les molécules dans le niveau S_1 qui vont se désexciter vers S_0 on utilise le temps τ_r , mais si on regarde l'ensemble des molécules on utilise τ_f **le temps global de durée de vie de fluorescence.**

Le temps étant lié au rendement on remarque que :

$$\tau_f = \tau_r \times \phi$$

Points essentiels



Le spectre de corps noir est **continu** et possède un **maximum**.



Le déclin de la fluorescence est souvent plus rapide que le déclin de la phosphorescence.



Rendement quantique ϕ et **durée de vie τ** de fluorescence caractérisent un fluorophore.

QCM

Selon la cause de l'excitation on définit différents types de luminescence. Quelle proposition contient les bonnes correspondances entre mode d'excitation et type de luminescence ?

1. Lumière

2. Réactions biochimiques

3. Electrons accélérés

4. Rayons X

5. Réactions chimiques

a. Cathodoluminescence

b. Bioluminescence

c. Photoluminescence

d. Chimiluminescence

e. Radioluminescence

A) 1e 2b 3c 4a 5b

B) 1c 2b 3c 4a 5d

C) 1c 2b 3a 4c 5d

D) 1c 2d 3b 4a 5b

E) 1c 2b 3a 4e 5d

Correction

1. Lumière	c. Photoluminescence
2. Réactions biochimiques	b. Bioluminescence
3. Electrons accélérés	a. Cathodoluminescence
4. Rayons X	e. Radioluminescence
5. Réactions chimiques	d. Chimiluminescence

La bonne réponse est E :

1c 2b 3a 4e 5d

Plan du cours

I. Incandescence et luminescence -
Phosphorescence et fluorescence

II. Emission spontanée / Emission stimulée -
Effet laser

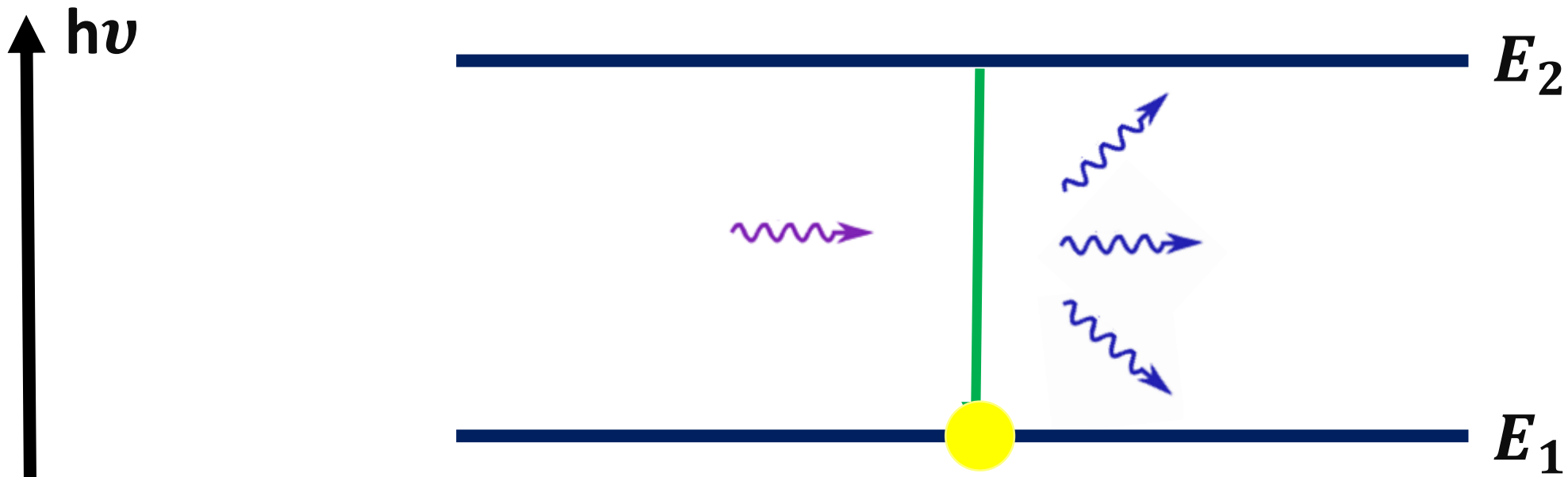
III. Cavité résonnante

IV. Divers types de lasers

II. Emission spontanée / Emission stimulée - Effet laser

Emission spontanée

Les atomes ou molécules se désexcitent de façon **spontanée**, les photons étant émis de façon **aléatoire** et dans toutes les directions.



Emission stimulée

Prédit par **Einstein**, un photon incident sur un électron excité peut le forcer à se désexciter en émettant deux photons de **caractéristiques identiques** à celles du photon incident. Les deux photons produits seront notamment de même énergie, de même direction, et de même polarisation.

Les deux photons produits seront aussi **en phase** et pourront à leur tour provoquer l'émission induite chacun d'un autre photon, conduisant à un **processus d'amplification de lumière**.

C'est le principe du **LASER** (**L**ight **A**mplification
by **S**timulated **E**mission of **R**adiation)

LE LASER

Toutes les animations et explications sur
www.toutestquantique.fr

Les principes de base du laser :



Un milieu amplificateur



Une source externe d'énergie :

le pompage



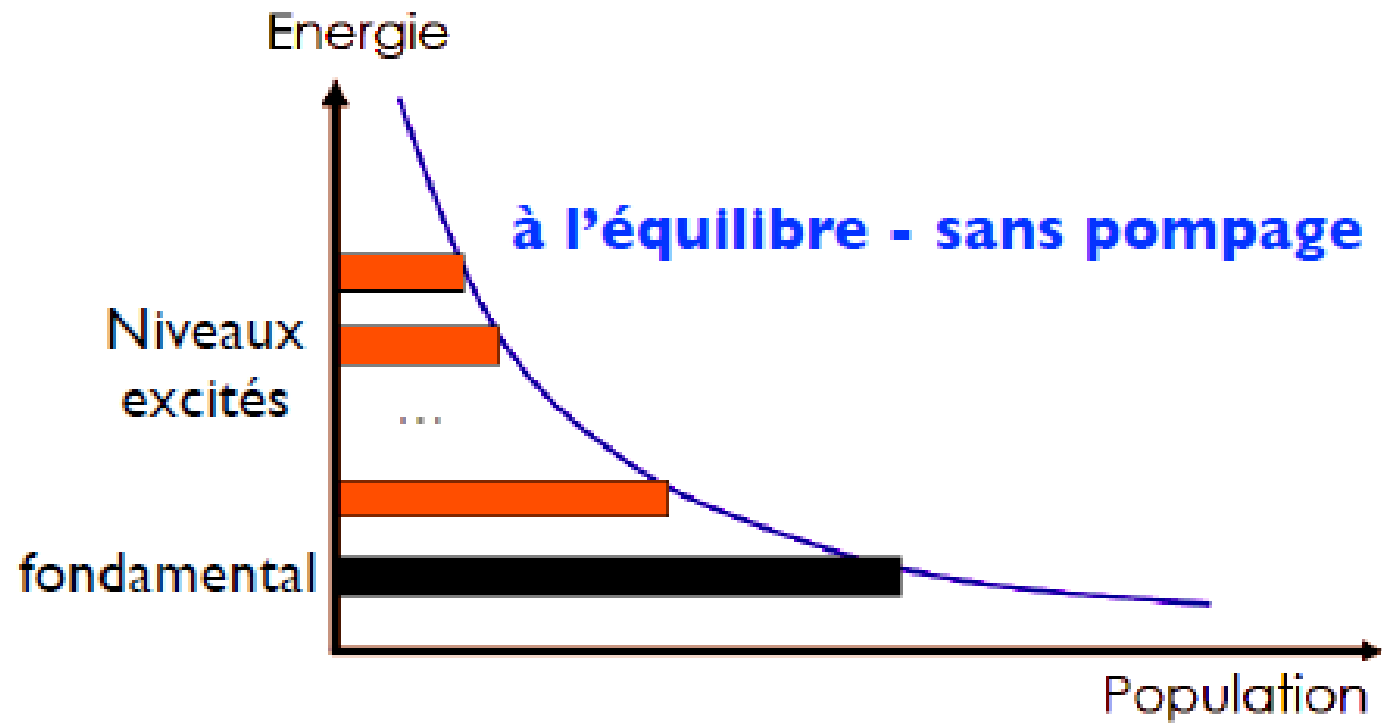
Une cavité résonante

L'inversion de population

C'est le phénomène le plus compliqué, qui met le plus en cause l'effet laser, car il s'agit processus mettant les atomes dans un état excité, grâce au **pompage**. Il consiste à changer la population de son état d'équilibre vers un état de non équilibre. **C'est l'inversion de population.**

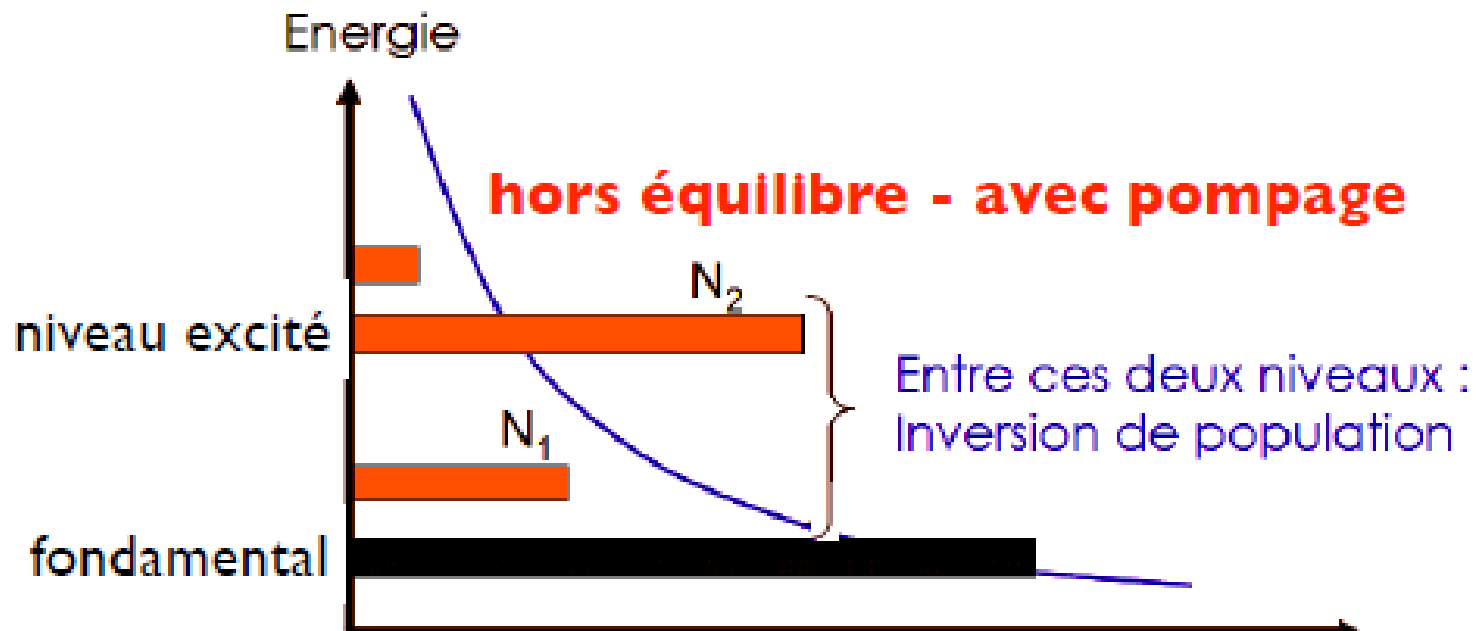
A « l'équilibre thermodynamique », les populations des niveaux sont régies par la statistique de Boltzmann ($N_i \propto \exp(-E_i/k_B T)$)

On notera N la population d'atomes dans les schémas.



Pour sortir de cet **équilibre thermodynamique (ci-contre)** il faut donc forcer l'inversion de population en pompant le milieu de sorte à avoir :

$$N_{\text{excité}} > N_{\text{fondamental}}$$



Toutefois, pour une transition donnée, la **probabilité d'une émission stimulée** (pour un atome dans l'état excité) **est égale** à la **probabilité d'une absorption** (pour un atome dans l'état fondamental).

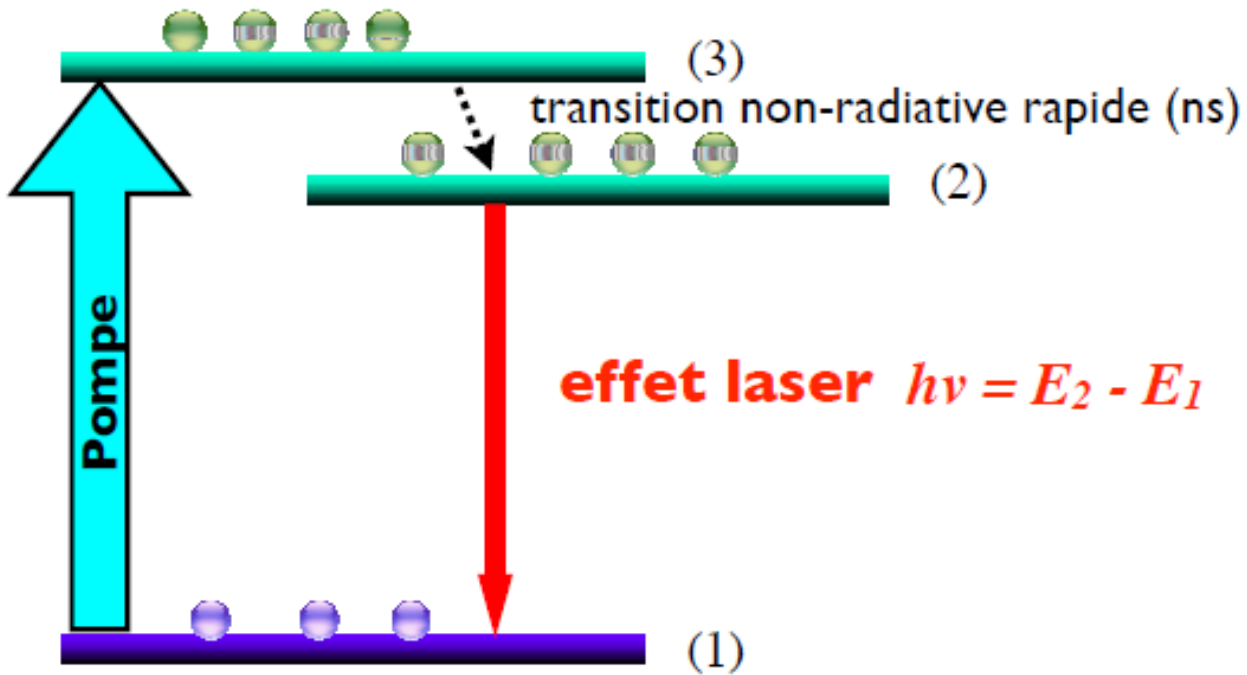
Il est donc **impossible** en pompant une seule transition atomique d'obtenir une inversion de population ($N_2 > N_1$) :

Pas de laser à 2 niveaux !

Au maximum, pour un fort pompage, on aurait $N_1 = N_2$.

Il faudra donc **au minimum 3 niveaux**.

Le laser à 3 niveaux



Il s'agit de procéder cette fois à un pompage de la population de E_1 vers E_3 . La population de E_3 descend ensuite vite remplir le niveau E_2 via une **transition non radiative**. L'intensité du laser étant très fortement lié à la différence entre N_1 et N_2 , la difficulté est en fait de vider le niveau (1) car le niveau fondamental est repeuplé dès que le laser fonctionne.

Ainsi, il existe un **seuil de transparence** : il faut pomper suffisamment fort pour atteindre $\Delta N = 0$. Si $N_2 \leq N_1$: **pas d'effet laser**.

L'effet laser se produit donc selon **deux conditions** :



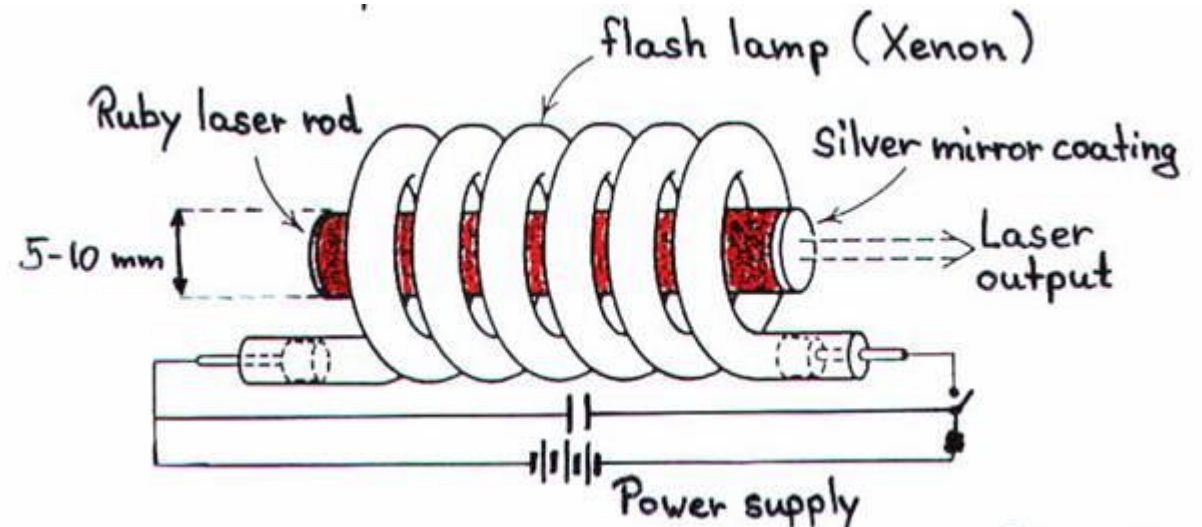
Pompage efficace pour que **$N_2 > N_1$**



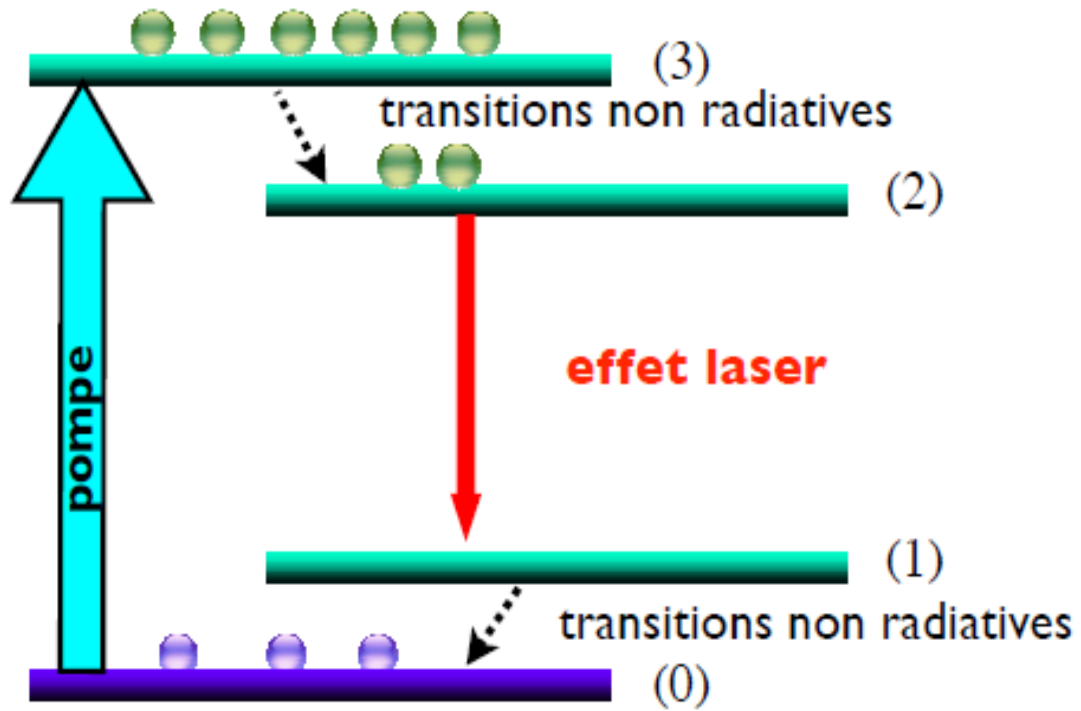
Transition très rapide de E_3 vers E_2 . Elle doit être plus rapide que l'émission laser de E_2 vers E_1 .

Exemple de laser à 3 niveaux :

Le laser solide à rubis



Le laser à 4 niveaux



Beaucoup plus facile à réaliser grâce à l'existence d'un niveau (1), qui est quasiment **vide** à l'équilibre thermodynamique, d'énergie E_1 un peu plus élevée que l'énergie E_0 du fondamental. On procède à un pompage et une inversion de population entre E_0 et E_3 . La population de E_3 se vide vers E_2 **sans émission radiative** et l'effet laser va se faire entre E_2 et E_1 .

Pas de seuil de transparence :

$\Delta N > 0$ dès que le pompage est actif.

Points essentiels



L'émission spontanée est à la base de la fluorescence \neq de **l'émission stimulée qui est à la base de l'effet laser.**



Les principes du laser : une cavité résonante, une source externe d'énergie (**le pompage**), un milieu amplificateur.



Le but du pompage est **l'inversion de population**, pour obtenir : **$N_{\text{excité}} > N_{\text{fondamental}}$**



Pas de laser à 2 niveaux ! Existence d'**un seuil de transparence** à 3 niveaux qui est absent à 4 niveaux.

QCM

A propos de l'émission spontanée et de l'émission stimulée stimulée, identifiez la ou les proposition(s) correcte(s) :

- A) L'émission spontanée est un phénomène d'excitation spontanée des atomes ou des molécules.
- B) Les photons issues d'une émission stimulée sont émis de façons aléatoire et dans toutes les directions.
- C) La fluorescence est basée sur le principe d'émission spontanée.
- D) L'émission stimulée est le principe à la base du laser.
- E) Toutes les propositions sont fausses.

Correction

Réponse : CD

- A) L'émission spontanée est un phénomène ~~d'excitation~~ de **désexcitation** spontanée des atomes ou des molécules. **X**
- B) Les photons issues d'une émission ~~stimulée~~ **spontanée** sont émis de façons aléatoire et dans toutes les directions. **X**
- C) La fluorescence est basée sur le principe d'émission spontanée. **✓**
- D) L'émission stimulée est le principe à la base du laser. **✓**
- E) Toutes les propositions sont fausses. **X**

Plan du cours

I. Incandescence et luminescence -
Phosphorescence et fluorescence

II. Emission spontanée / Emission stimulée -
Effet laser

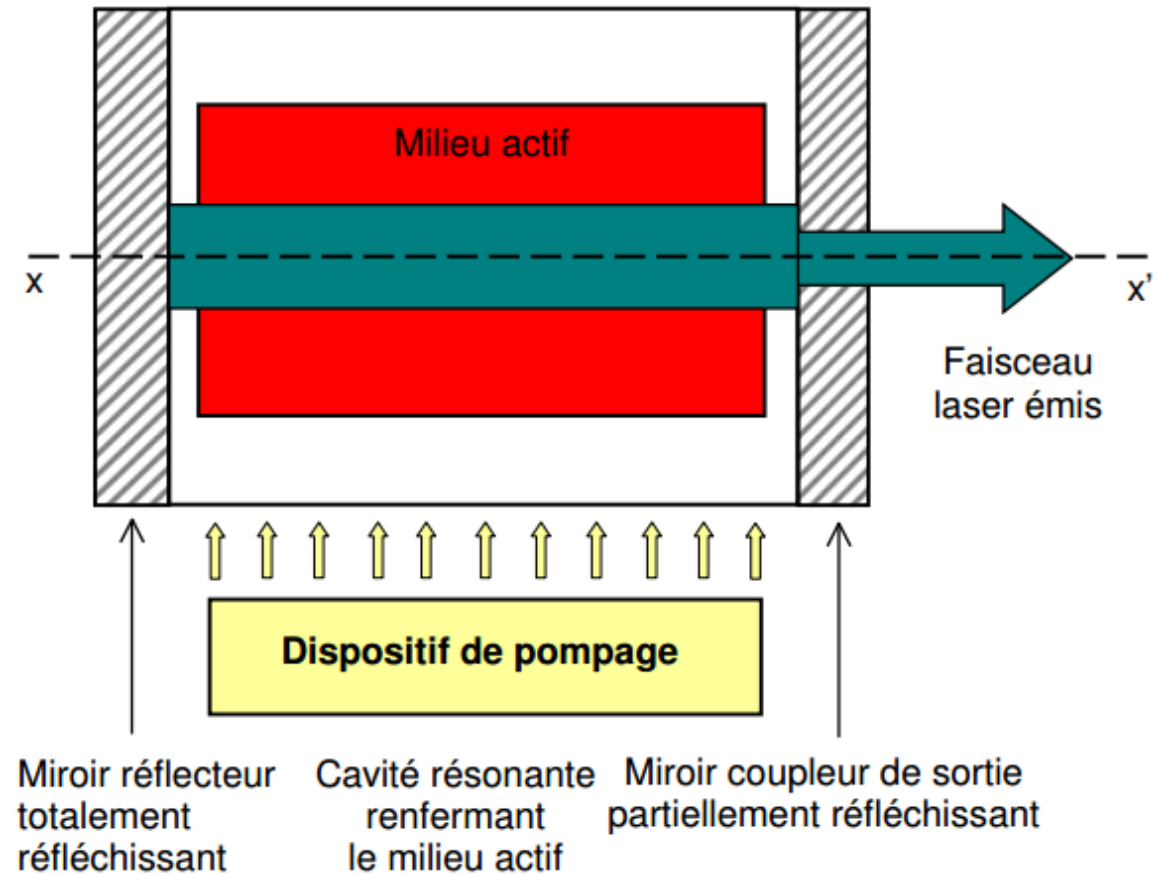
III. Cavité résonnante

IV. Divers types de lasers

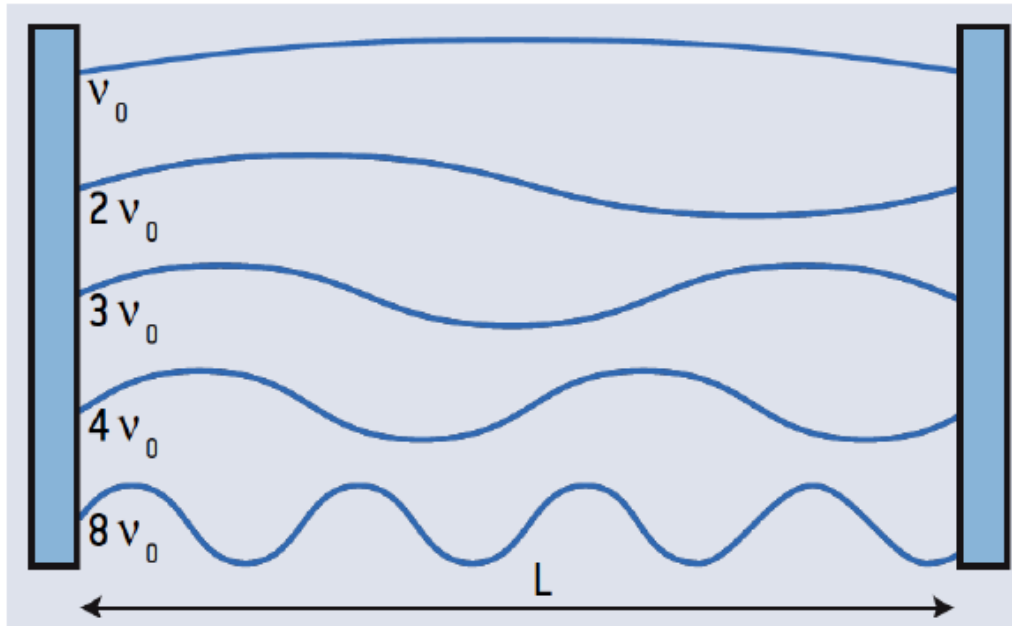
III. Cavité résonante

Pour augmenter l'amplification du faisceau incident, on lui fait traverser l'amplificateur plusieurs fois, c'est le rôle de la **cavité résonante**, qui est le plus souvent en optique une **cavité Fabry-Pérot** constituée de **deux miroirs plans parallèles**.

Ceux-ci espacés d'une distance égale à **un nombre entier de demi-longueurs d'ondes**. Grâce à cette cavité résonante qui constitue un oscillateur optique, on obtient une amplification résonante de lumière qui favorise l'émission stimulée.



La condition de résonance



Les photons ont une composante ondulatoire. On cherche à créer dans la cavité **une onde stationnaire** pour entretenir l'aller-retour d'une telle onde à la fréquence ν .

La condition pour ça, c'est que lorsqu'on a fait un aller-retour, c'est à dire $2L$, **on doit avoir un nombre entier de longueur d'ondes** soit $n\lambda$. $\lambda = c / \nu$ donc ν est un multiple d'une fréquence de référence qui est $c / (2L)$.

« $c / (2L)$ » donne une fréquence de **résonance fondamentale** et toutes les autres fréquences, permettant d'avoir des **ondes stationnaires**, sont des multiples de cette valeur.

La condition de résonance est donc satisfaite quand :

$$2L = n \lambda \Leftrightarrow \nu = n c / (2L) = n \nu_r$$

C'est la condition de re-bouclage en « phase » sur un aller-retour.

La condition d'oscillation

On trouve un miroir de chaque côté de la cavité. Il s'avère que l'un est très réfléchissant et l'autre l'est un peu moins et laisse passer une toute petite partie du rayonnement ($1/1000^e$ de ce qu'il reçoit). L'un des miroirs est donc **semi-réfléchissant** afin de permettre au faisceau de sortir du dispositif. Mais il faut un juste milieu.

Cette perte (volontairement) engendrée s'appelle η . Il représente **le facteur de transmission du miroir**. Elle doit donc être **compensée** par l'effet laser. Il s'agit donc d'obtenir un gain, c'est-à-dire parvenir après de nombreux aller-retours à une augmentation de l'amplification. Ce gain G est à peine supérieur à 0 et croît de manière exponentielle avec l qui est la longueur du milieu actif tel que $G = e^{gl}$.

Ainsi en notant **G le gain du milieu actif** et **η les pertes** sur un aller-retour, la condition d'oscillation laser pour un laser performant s'obtient quand :

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

Pertes par diffraction

L'effet de diffraction s'oppose à l'effet laser.

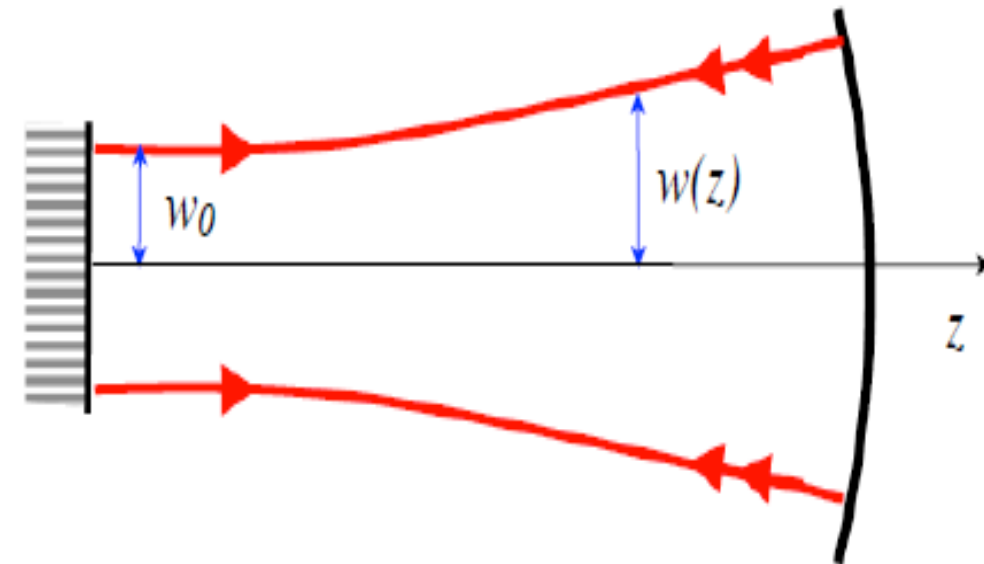
Le miroir va réfléchir le faisceau de photons suivant un angle lié à λ / a . Si cet angle est négligeable par rapport à l'angle sous lequel est vu l'autre miroir (« source du faisceau »), alors l'effet de diffraction sera faible.

La condition de diffraction

On décrit cette condition de diffraction en fonction de la distance à laquelle se situe l'autre miroir **égale à l'angle divisé par L**. On aura une perte par diffraction négligeable si :

$$\lambda L \gg a^2$$

Si la diffraction n'est pas négligeable, il faut utiliser d'autres astuces, comme un miroir qui est **concave** pour que le trajet lumineux puisse revenir avec une trajectoire non rectiligne. Cela permet de contrer cette diffraction.



Points essentiels



La cavité résonante est constituée de **deux miroirs plans parallèles espacée** d'une distance **$n \times \frac{1}{2} \lambda$** .



La perte η via le miroir semi-réfléchissant doit être compensé par **le gain G** lié à l'amplification.



L'effet de diffraction dans une cavité résonnante s'oppose à l'effet laser.

QCM

A propos de la cavité résonnante, identifiez la ou les proposition(s) correcte(s) :

- A) En optique c'est souvent une cavité Fabry-Pérot constituée de deux miroirs plans perpendiculaires.
- B) Les miroirs sont espacés d'une distance égale à un nombre entier de demi-longueurs d'ondes.
- C) L'intérêt d'utiliser un miroir semi-réfléchissant est de permettre à une partie du faisceau de sortir du dispositif et à l'autre d'y rester.
- D) La diffraction contribue à l'effet laser
- E) Toutes les propositions sont fausses.

Correction

Réponse : BC

- A) En optique c'est souvent une cavité Fabry-Pérot constituée de deux miroirs plans ~~perpendiculaires~~ **parallèles**. **X**
- B) Les miroirs sont espacés d'une distance égale à un nombre entier de demi-longueurs d'ondes. **✓**
- C) L'intérêt d'utiliser un miroir semi-réfléchissant est de permettre à une partie du faisceau de sortir dans le dispositif et l'autre d'y rester. **✓**
- D) La diffraction ~~contribue~~ **s'oppose** à l'effet laser. **X**
- E) Toutes les propositions sont fausses. **X**

Plan du cours

I. Incandescence et luminescence -
Phosphorescence et fluorescence

II. Emission spontanée / Emission stimulée -
Effet laser

III. Cavité résonnante

IV. Divers types de lasers

IV. Divers types de lasers

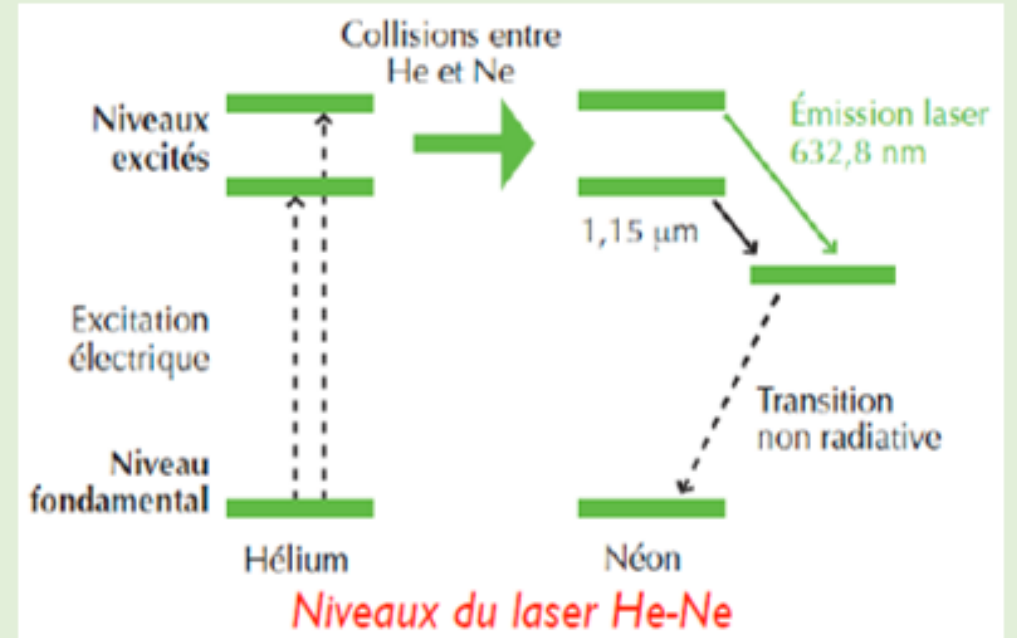
On termine enfin par une synthèse sur quelques types de laser.

- Il existe autant de laser que de milieu dans la matière.
- Il existe trois états de la matière : solide, liquide et gazeux, pour chacun il existe des lasers.

Laser à gaz

Le milieu amplificateur est constitué d'un gaz ou d'un mélange de gaz, en général contenu dans un tube en verre ou en quartz. Par une décharge électrique dans le gaz, on excite directement ou par collisions les atomes. Le gain optique dans le milieu étant faible, les pertes doivent l'être aussi : les miroirs utilisés sont très réfléchissants (plus de 99,9 % de réflexion).

- Le laser hélium-néon : L'hélium est utilisé comme gaz tampon (15% He, 85% Ne). Une alimentation électrique cède de l'énergie aux atomes d'He, qui transfèrent par collision cette énergie aux atomes de Ne. Sa raie laser la plus intense est dans le rouge.



Laser à solide

- Le laser à rubis : Le pompage est produit par un tube flash. Le faisceau laser émis est rouge ($\lambda = 694,3 \text{ nm}$).
- Le laser à néodyme : il suit le même principe (milieu actif : verre dopé en ions Nd^{3+}). L'émission est dans le proche infrarouge ($\lambda = 1,06 \text{ μm}$).
- Le laser titane-saphir.

Lasers à semi-conducteurs ou diodes laser

Les diodes lasers représentent aujourd'hui les lasers les plus vendus dans le monde. Ces dispositifs bien particuliers utilisent comme milieu amplificateur des matériaux semi-conducteurs. Ces lasers présentent l'avantage d'être compacts et d'avoir une bonne efficacité (environ 50%). Ils sont en revanche peu puissants (1 à 10 mW) et le faisceau est faiblement directionnel (divergence de 5° à 30°).

Application : lecteur CD, imprimante laser...

Lasers à colorants (liquide)

Dans les lasers à colorants, le milieu amplificateur est souvent liquide. Il est composé d'une solution que l'on enferme dans une cuve de verre et qui contient des molécules organiques de colorants. Pour l'excitation, les molécules de colorant diluées dans l'alcool étant bien incapables de conduire correctement le courant électrique, le pompage doit être optique.

Leur inconvénient est la photodégradation progressive du colorant qui doit donc être renouvelé régulièrement.

END !

Révissez-bien et bon courage pour le CCB de la tut' rentrée !

Pour toute question direction le forum !

Bonne journée !! 😊/