

Transferts quantiques d'énergie : principe du LASER

I. Transferts quantiques d'énergie : l'émission stimulée

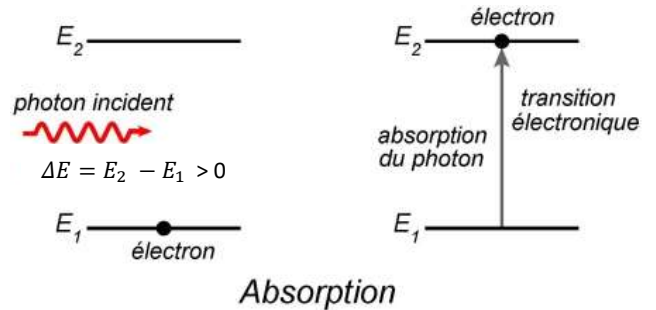
1. Rappels :

- Un photon est une particule associée à une radiation de fréquence ν , dont l'énergie est $E_{\text{photon}} = h \cdot \nu$

- Un atome peut **absorber un photon**, si celui-ci fait passer un de ses électrons d'un niveau d'énergie E_1 vers un niveau E_2 supérieur.

L'atome gagne alors l'énergie nécessaire à cette transition et apportée par le photon, ce qui s'exprime par :

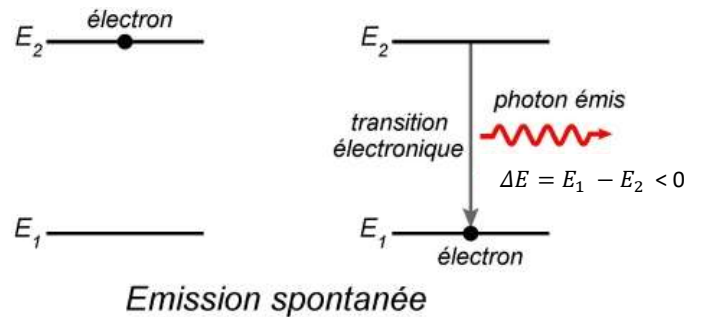
$$|\Delta E| = |E_2 - E_1| = E_{\text{photon}}$$



- De la même manière, un électron sur dans état excité (sur un niveau d'énergie E_2) n'y demeure pas longtemps ($10^{-8}s$ environ en moyenne). Il peut revenir à un niveau d'énergie E_1 plus bas en **émettant un photon**, par **émission spontanée**.

Celle-ci est un **phénomène aléatoire**, car on ne peut pas prévoir quand et comment la transition se fera, et le photon est émis selon une direction aléatoire. Le photon créé récupère l'énergie perdue par l'atome lors de la transition, ce qui s'exprime par :

$$E_{\text{photon}} = |\Delta E| = |E_1 - E_2|$$



- On rappelle également que la longueur d'onde λ associée à la fréquence ν de la radiation se calcule par : $\nu = \frac{c}{\lambda}$

où $h = 6,63 \times 10^{-34} J.s$ est la constante de Planck,

et $c = 3,00 \times 10^8 m.s^{-1}$ est la célérité de la lumière dans le vide.

Exercice :

L'analyse du spectre d'émission d'une lampe à vapeur de mercure permet construire le schéma simplifié suivant :

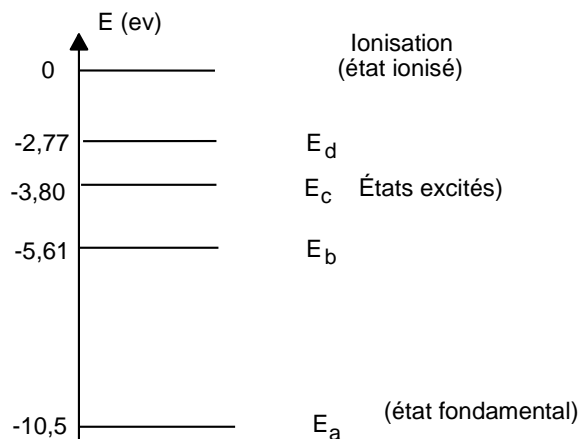
Données :

Constante de Planck : $h = 6,62 \times 10^{-34} J.s$

Vitesse de la lumière dans le vide :

$c = 3,00 \times 10^8 m.s^{-1}$

$1eV = 1,60 \times 10^{-19} J$



- Calculer la longueur d'onde d'un photon émis lors du passage d'un atome de mercure du niveau excité E_b au niveau fondamental E_a .
- Un photon d'énergie $E_2 = 3,40 \cdot 10^{-13} \mu J$ est-il absorbé par un atome de mercure ?
- Un photon de fréquence $f_1 = 2,61 \cdot 10^{15} Hz$ est-il absorbé par un atome de mercure ?
- Un photon de longueur d'onde $\lambda_3 = 437 nm$ est-il absorbé par un atome de mercure ?

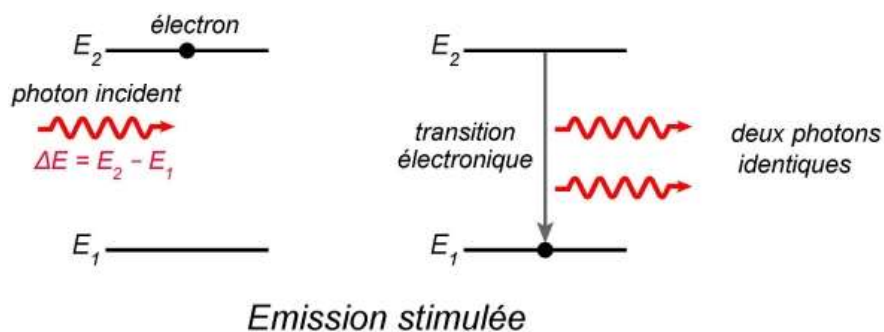
Correction :

- $\Delta E = E_b - E_a = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ also $\lambda = \frac{h \cdot c}{\Delta E} = 2,54 \times 10^{-7} m \approx 254 nm$
- $E_1 = h \cdot f_1 \approx 10,8 eV$ énergie supérieure à l'énergie d'ionisation. Est absorbée : l'électron sera arraché à l'atome et s'éloignera avec une vitesse non nulle ($10,8 - 10,5 = 0,3 eV$ correspond à son énergie cinétique).
- $E_2 \approx 2,13 eV$ Ne correspond à aucune transition. N'est pas absorbée.
- $E_3 = \frac{h \cdot c}{\lambda_3} \approx 2,84 eV = E_d - E_b$ Est absorbé et induira une transition du niveau D vers B.

2. Emission stimulée :

Il existe une troisième possibilité de transition, prédite en 1917 par Albert Einstein (1879-1955). Quand un photon ayant exactement la différence d'énergie $\Delta E = E_2 - E_1$ entre deux états E_1 et E_2 passe à proximité d'un électron dans l'état E_2 , il déclenche la transition de l'électron vers l'état E_1 .

Il y a alors émission d'un nouveau photon d'énergie ΔE .



Comme ils ont même énergie, ils ont **même fréquence** et **même longueur d'onde**. De plus, ils ont aussi **même phase** (pas de décalage temporel).

En somme, on obtient deux photons identiques à partir d'un seul photon incident.

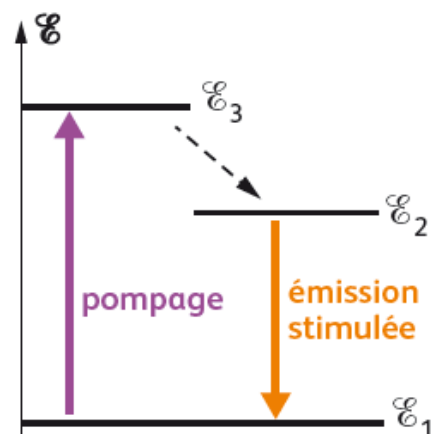
II. Le LASER

L'émission stimulée est à la base du fonctionnement du LASER, acronyme anglais de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (= amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement). Toutefois, pour fonctionner, le LASER doit respecter certaines contraintes.

1. Pompage : inversion de population

Pour des atomes au repos à température ambiante, les électrons sont quasiment tous à l'état fondamental ; très peu sont dans des états excités. Cela ne permet pas des émissions stimulées en quantité suffisante. Il faut donc réaliser une inversion de population, c'est-à-dire amener suffisamment d'électrons dans l'état excité voulu.

Pour cela, on réalise un pompage optique : il consiste à faire passer les électrons sur des états excités supérieures au niveau E_2 par absorption d'énergie ; les électrons vont rapidement ($10^{-8}s$) se désexciter par des transitions non radiatives (vibrations du cristal, ...) pour transiter sur l'état E_2 où ils restent pendant un temps plus long ($10^{-3}s$).



Remarques :

- Tout matériau ne peut convenir pour réaliser un LASER. Par exemple, un système à deux niveaux ne peut pas permettre le fonctionnement correct du LASER.

- Des molécules peuvent également être utilisées : LASER à CO₂ par exemple

2. Emission spontanée :

Les atomes qui ont subi l'inversion de population constituent le milieu actif du LASER.

La moindre émission spontanée d'énergie $\Delta E = E_2 - E_1$ va alors produire un photon, qui peut alors induire des émissions stimulées en cascade avec d'autres atomes. Cette réaction en chaîne génère un grand nombre de photons en peu de temps.

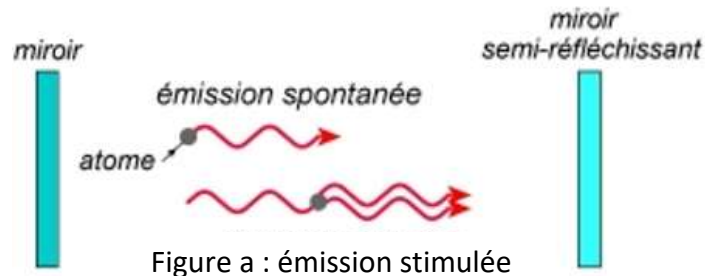


Figure a : émission stimulée

3. Amplification : cavité optique

Pour amplifier davantage le phénomène, le milieu actif est inséré dans une cavité optique, constituée par deux miroirs : un totalement réfléchissant et un semi-réfléchissant. Les photons émis selon l'axe de cette cavité rebondissent sur les miroirs, ce qui engendre, au cours d'allers-retours, de plus en plus d'émissions stimulées, donc de plus en plus de photons.

Une part des photons s'échappe par le miroir semi-réfléchissant, constituant le faisceau LASER.

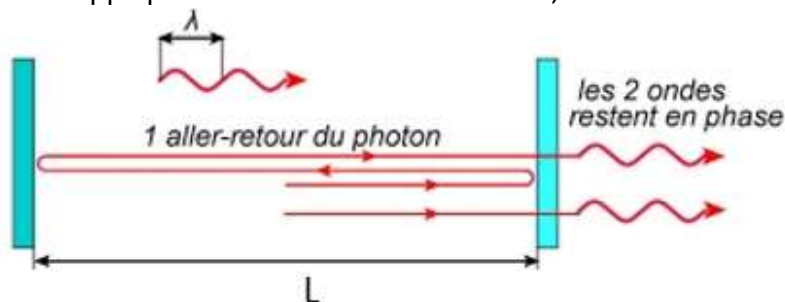


Figure b : amplification

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Laser>

Condition sur la longueur L de la cavité pour obtenir une amplification :

Afin que le LASER émette un faisceau lumineux, il est nécessaire que les photons restent en phase, quel que soit le nombre d'allers-retours effectués dans la cavité ; il faut éviter que les ondes en se superposant produisent des interférences destructives (qui entraîneraient l'extinction du faisceau).

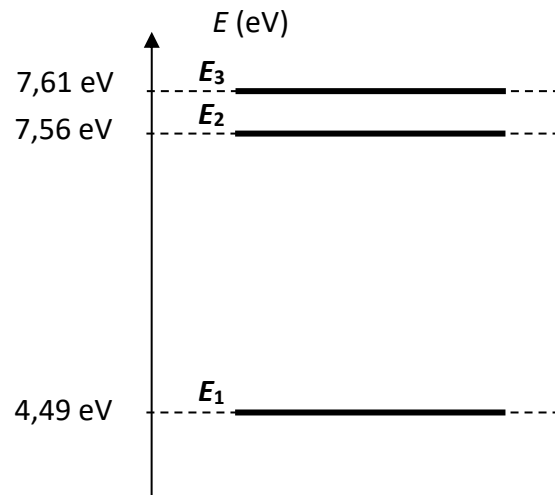
- Rappeler la condition sur la différence de marche entre 2 ondes (2 photons) δ pour que les interférences soient constructives :
Pour que les interférences soient constructives, il faut que $\delta = k \cdot \lambda$
- Quelle est la différence de marche entre les deux photons représentés sur la figure b :
D'après la figure (b), le photon du haut parcourt une distance $\delta = 2L$ en plus par rapport au photon du bas.
- En déduire la condition entre L (distance entre les 2 miroirs = longueur de la cavité résonante) et λ pour obtenir des interférences constructives :

Condition pour obtenir des interférences constructives : $2L = k \cdot \lambda$ d'où $L = k \cdot \frac{\lambda}{2}$

Exercice :

La lumière émise par une source LASER provient de l'émission stimulée d'atomes excités par pompage optique. On a représenté sur le document 1 deux niveaux d'énergie d'un atome présent dans la cavité de la source LASER.

- Indiquer par une flèche :
 - la transition correspondant au pompage
 - la transition correspondant à l'émission stimulée
- Quelle est la fréquence de la radiation qu'il faut utiliser pour réaliser le pompage optique ?
- Quelle est la longueur d'onde de la radiation émise par l'atome ?
Quelle est la couleur du Laser
- Quelle est la valeur de la longueur d'onde de la radiation lumineuse qu'il faut envoyer sur l'atome pour provoquer une émission stimulée de cet atome ?
- Parmi les longueurs suivantes, laquelle correspond à celle de la cavité résonante ?
 $L_1 = 0,301 \text{ mm}$ $L_2 = 0,303 \text{ mm}$ $L_3 = 0,305 \text{ mm}$



Données : $h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ $3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$

Correction :

- Pompage : de E_1 vers E_3 Emission stimulée : de E_2 vers E_1
- $h \cdot \nu_p = E_3 - E_1$ d'où $\nu_p = \frac{E_3 - E_1}{h}$ A.N. $\nu_p = \frac{(7,61 - 4,49) \times 1,60 \times 10^{-19}}{6,62 \times 10^{-34}} = 4,71 \times 10^{14} \text{ Hz}$
 (longueur d'onde : $\lambda = \frac{c}{\nu_p}$ A.N. $\lambda = \frac{3,0 \times 10^8}{4,71 \times 10^{14}} = 6,37 \times 10^{-7} \text{ m} = 637 \text{ nm}$)
- $\frac{h \cdot c}{\lambda_e} = |E_1 - E_2|$ d'où $\lambda_e = \frac{h \cdot c}{|E_1 - E_2|}$
 A.N. $\lambda_e = \frac{6,62 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{|(4,49 - 7,56) \times 1,60 \times 10^{-19}|} = 4,04 \times 10^{-7} \text{ m} = 404 \text{ nm}$
 il s'agit d'une lumière verte.
- Pour une émission stimulée, la longueur d'onde de la radiation incidente doit être de 404 nm également.
- On calcule $\frac{L}{\lambda_e}$ pour chaque longueur :
 $\frac{0,301 \times 10^6}{404} = 745,05$ $\frac{0,303 \times 10^6}{404} = 750$ $\frac{0,305 \times 10^6}{404} = 754,95$
 Seule la longueur $L_2 = k \cdot \lambda$ avec k nombre entier.

4. Propriétés de la lumière LASER

- Les photons ont même fréquence, ce qui fait que la lumière du LASER est **monochromatique**.
- Les photons constituant le faisceau LASER sont émis dans une seule direction. Un faisceau LASER est **directif**.
- Les photons ont même phase : le rayonnement LASER est **cohérent**. Il se prête bien aux expériences d'interférences
- La puissance lumineuse émise est concentrée au niveau du spot LASER. La **puissance surfacique** du faisceau peut dépasser celle du rayonnement solaire reçu sur Terre (1 kW/m^2), même pour des LASER de faibles puissances. Il y a concentration spatiale de l'énergie. Du point de vue sécurité, il

convient de manipuler un LASER avec précaution, car le faisceau peut occasionner des dommages oculaires irréversibles au niveau de la rétine.

Rappel : relation puissance énergie :

$$P = \frac{E}{\Delta t}$$

La [Commission électrotechnique internationale](#) (CEI) a classé les pointeurs laser en cinq catégories¹ :

- Classe 1 : la puissance de sortie ne peut pas entraîner de lésions oculaires.
- Classe 2 : la puissance de sortie est inférieure à 1 mW. En cas d'exposition, le réflexe naturel de cligner des yeux et de détourner la tête suffit à protéger du risque de lésion.
- Classe 3A : la puissance de sortie est inférieure à 5 mW, ce qui limite la puissance atteignant la rétine à 1 mW lorsque la pupille est dilatée au maximum (ouverture estimée à 7 mm). Par conséquent, l'exposition accidentelle à un laser de classe 3A ne devrait pas être plus dangereuse que l'exposition à un laser de classe 2.
- Classe 3B : la puissance de sortie est inférieure à 500 mW, suffisante pour provoquer des lésions oculaires qui sont décrites à partir d'une puissance de 150 mW².
- Classe 4 : la puissance de sortie est supérieure à 500 mW. Ces lasers peuvent causer des lésions oculaires et cutanées et même provoquer l'inflammation des objets sur lesquels ils sont dirigés.

En France, la fabrication, l'importation et la vente d'appareils à laser de classe supérieure à 2 est strictement limitée.

Exercice n°26 P 420

26 Laser médical

COMPÉTENCES Connaître, analyser, réaliser.

En chirurgie, pour l'ablation des tumeurs, on utilise un laser à dioxyde de carbone de longueur d'onde $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$.

- a. À quel domaine spectral appartient cette radiation ?
- b. Pour que le chirurgien puisse diriger correctement le faisceau sur la tumeur, on utilise un laser He-Ne auxiliaire, de longueur d'onde $\lambda = 632,8 \text{ nm}$. Quelle est la couleur du faisceau ?
- c. Justifier son utilisation.
- d. Le laser à dioxyde de carbone émet chaque seconde $2,7 \times 10^{21}$ photons.
Calculer l'énergie transportée par un photon et en déduire la puissance du faisceau.

- a. Domaine des infrarouges ($10\mu\text{m}=1 \times 10^{-5}\text{m}$)
- b. LA couleur du faisceau est rouge.
- c. Il faut un guide visible pour bien cibler les ondes infrarouges invisibles.

d. Energie d'un photon : $E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ A.N. $E = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{10,6 \times 10^{-6}} = 1,88 \times 10^{-20} \text{ J}$

Energie de tous les photons émis en 1s : $E_{\text{tot}} = E \cdot N$
 A.N. $E_{\text{tot}} = 1,88 \times 10^{-20} \times 2,7 \times 10^{21} = 50,8 \text{ J}$

Puissance : $P = \frac{E}{\Delta t}$ A.N. $P = \frac{50,8}{1} = 50,8 \text{ W}$

Exercice n° 29 P 420

29 ★ Photons émis par un laser

COMPÉTENCES Analyser, réaliser.

Les lasers Hélium-Néon utilisés dans les lycées ont une puissance $\mathcal{P} = 2 \text{ mW}$. Ils émettent une radiation rouge de longueur d'onde $\lambda = 632,8 \text{ nm}$.

Quel est l'ordre de grandeur du nombre de photons émis chaque seconde ?

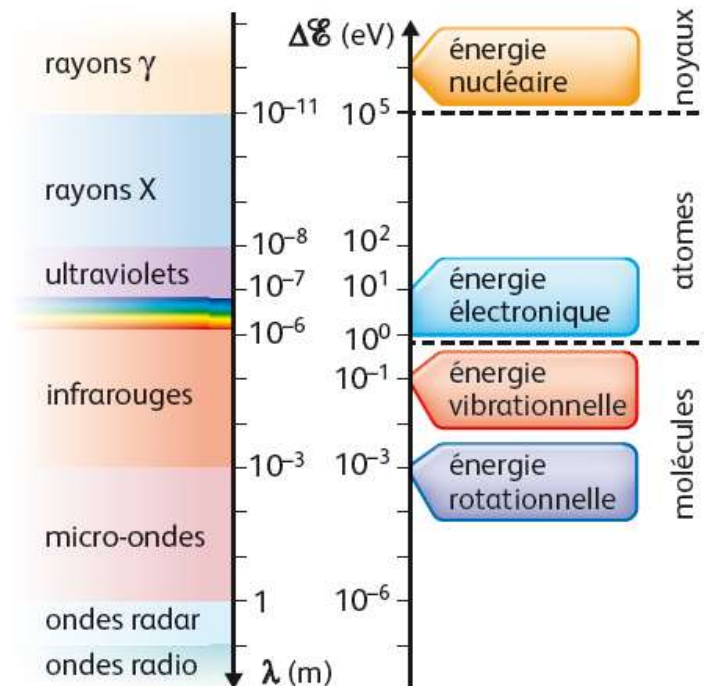
Energie d'un photon : $\Delta E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$ A.N. $\Delta E = 3,1 \times 10^{-19} \text{ J}$

Energie émise chaque seconde : $2 \times 10^{-3} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$

Nombres de photons émis chaque seconde :
$$N = \frac{2 \times 10^{-3}}{3,1 \times 10^{-19}} = 6,4 \times 10^{15} \text{ photons.s}^{-1}$$

III. Domaine spectral et transitions quantiques :

Comme les atomes, les molécules ions ou noyaux possèdent des niveaux d'énergie quantifiés. Les radiations associées aux photons échangés lors des différents types de transferts d'énergie appartiennent à des niveaux spectraux très différents :

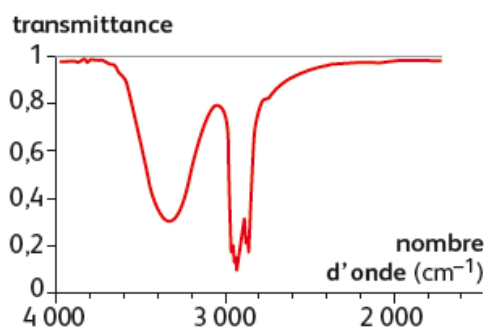


⇒ Ex P 420 n°25

Voici l'énoncé d'un exercice et un guide (en violet) ; ce guide vous aide à rédiger la solution détaillée et à retrouver les réponses aux questions posées.

Énoncé

La figure ci-contre représente une partie du spectre infrarouge de l'hexan-1-ol en phase condensée.



a. Vérifier que la bande $[2000 \text{ cm}^{-1}; 4000 \text{ cm}^{-1}]$ correspond bien au domaine des infrarouges.

► Présenter les limites du domaine des OEM infrarouges pour justifier le calcul des longueurs d'onde de cette bande, et conclure qu'elle est bien située dans le domaine IR.

b. Le rayonnement infrarouge permet-il aux atomes de la molécule d'hexan-1-ol de changer de niveau d'énergie électronique ?

► Expliquer pourquoi il faut calculer l'énergie transportée par le photon infrarouge le plus énergétique du domaine considéré.

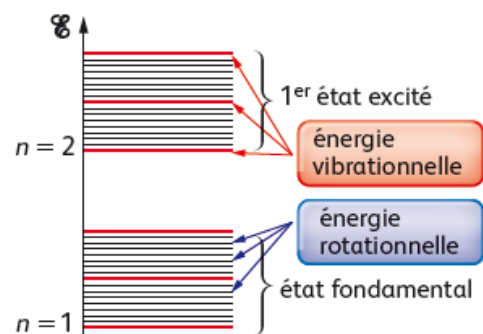
► Conclure en indiquant que le rayonnement infrarouge ne permet pas de changer de niveau d'énergie électronique.

c. Quels sont les niveaux d'énergie de la molécule mis en jeu lors de l'interaction entre la molécule et le rayonnement infrarouge ?

► Rappeler les différentes énergies d'une molécule et l'ordre de grandeur des énergies transférées.

► Vérifier que des transitions entre ces différents niveaux d'énergie sont possibles.

d. La figure ci-dessous représente les différents niveaux d'énergie d'un atome dans une molécule.



Expliquer pourquoi on observe des bandes d'absorption et non des raies d'absorption lorsque l'on réalise un spectre infrarouge.

► Utiliser les ordres de grandeur des énergies vibrationnelles et rotationnelles, puis utiliser les notations du schéma pour conclure que les raies d'absorption sont trop proches pour être séparées.

a. Rappel : nombre d'onde $\sigma = \frac{1}{\lambda}$ donc $\lambda = \frac{1}{\sigma}$

$$\lambda_1 = \frac{1}{2000} = 5 \times 10^{-4} \text{ cm} \quad \text{soit} \quad 5 \times 10^{-6} \text{ m} \quad \text{soit} \quad 5 \mu\text{m}$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{4000} = 2,5 \times 10^{-3} \text{ cm} \quad \text{soit} \quad 2,5 \times 10^{-5} \text{ m} \quad \text{soit} \quad 25 \mu\text{m}$$

$5 \mu\text{m} < \lambda < 25 \mu\text{m}$ correspond au domaine des infrarouges dont les longueurs d'ondes sont supérieures à 800nm et inférieures à 1mm

b. Calcul de l'énergie du photon infrarouge le plus énergétique ($\lambda_1=5\mu\text{m}$) : $E_1 = \frac{h.c}{\lambda_1}$

$$\text{A.N.} \quad E_1 = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{5 \times 10^{-6}} = 4 \times 10^{-20} \text{ J} \quad \text{soit} \quad E_1 = 2,5 \times 10^{-1} \text{ eV}$$

Pour une transition de niveau d'énergie électronique, il faut $\Delta E > 1 \text{ eV}$. Le photon infrarouge le plus énergétique ne permet pas une telle transition.

c. Calculons E_2 ($\lambda_2=25\mu\text{m}$) $E_2 = \frac{h.c}{\lambda_2} = \frac{E_1}{5}$ car $\lambda_2 = 5\lambda_1$ d'où $E_2 = 5,0 \times 10^{-2} \text{ eV}$

d. Les états possibles de la molécule correspondent à des niveaux d'énergie nombreux et très serrés, pratiquement continus ; un grand nombre de photons d'énergies différentes peuvent être absorbés pour faire passer la molécule d'un des niveaux fondamentaux aux niveaux du 1^{er} état excité, ce qui se traduit par l'absorption d'une bande (« plage ») continue d'énergie.