



# Chapitre E2. Transferts quantiques et dualité onde-particule

## A- Dualité onde-particule de la lumière

### A1- Le modèle ondulatoire de la lumière (rappels)

Certaines propriétés de la lumière peuvent être décrites à l'aide du modèle ondulatoire de la lumière. Selon ce modèle, la lumière est **une onde électromagnétique** caractérisée par sa fréquence, sa célérité, sa longueur d'onde. Ce modèle permet d'interpréter des faits expérimentaux comme les interférences lumineuses, la diffraction de la lumière, l'effet Doppler, etc (voir chapitres A5 et A6).

### A2- Le modèle quantique de la lumière

Pour interpréter certains faits expérimentaux que le modèle ondulatoire ne permettait pas de prévoir, Albert Einstein a proposé en 1905 de décrire la lumière comme des "paquets" d'énergie indivisibles : **les photons**.

Un photon possède :

- une masse nulle, une charge nulle
- une énergie de valeur :  (loi de Planck – Einstein)

▷  $E$  : énergie du photon (en J)

▷  $f$  : fréquence du rayonnement  $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  : constante de Planck

Le photon n'est **ni une particule ni une onde** : c'est une **entité quantique** qui possède certaines propriétés rappelant celles des ondes, certaines propriétés rappelant celles des particules et d'autres propriétés qui ne relèvent d'aucun de ces deux modèles classiques. On peut parler de "quanton".

## B- Dualité onde-particule de la matière

### B1- Les ondes de matière de de Broglie

#### Fait expérimentaux :

Dans certaines conditions, des particules peuvent avoir un comportement qui rappelle celui des ondes. Par exemple, les atomes peuvent interférer entre eux (voir activité 3). Or l'interférence est un comportement typique des ondes périodiques.

#### Modélisation par Louis de Broglie

Pour décrire ces expériences Louis de Broglie en 1926 a généralisé à la matière la dualité onde/particule admise pour la lumière.

À tout objet matériel on peut associer une onde de matière de longueur d'onde  $\lambda$  telle que :



▷  $p$  : quantité de mouvement de l'objet (en  $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

▷  $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  : constante de Planck

▷  $\lambda$  : longueur d'onde en m.

### B2- Condition de la prise en compte de la dualité ondes-particule

Le modèle ondulatoire de la matière n'est pas toujours pertinent pour décrire une situation. Par exemple la prise en compte du caractère ondulatoire des objets que étudiés en mécanique (projectiles, planètes, etc.) n'aurait aucun intérêt. Le modèle newtonien suffit à l'étude de ces situations.

Pour déterminer si le modèle quantique est pertinent il faut :

- calculer la longueur d'onde de *de Broglie*  $\lambda$  de l'onde associée à l'objet étudié ;
- déterminer une dimension caractéristique, notée  $a$ , de l'environnement de l'objet, ou de l'objet lui-même s'il ne rencontre pas d'obstacle.

Alors :

plus  $\lambda$  est grande devant  $a$ , plus le caractère ondulatoire de l'objet considéré est important et plus le modèle quantique sera pertinent pour étudier son comportement.

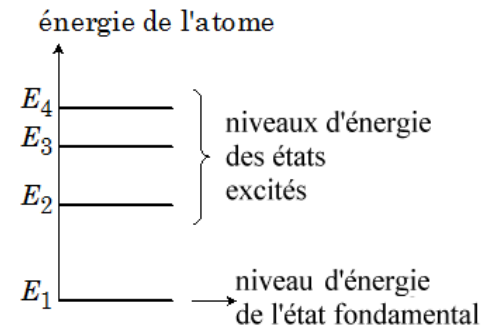


## C- Transferts quantiques d'énergie

### C1- Quantification de l'énergie des atomes

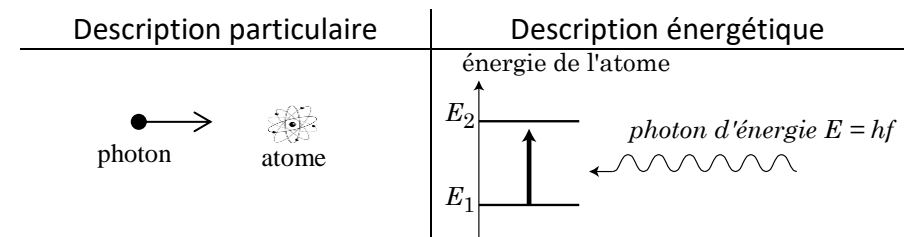
À l'échelle microscopique l'énergie ne satisfait pas les lois classiques vues dans les chapitres précédents. Elle est **quantifiée**, c'est-à-dire ne peut prendre que certaines valeurs discontinues appelées **les niveaux d'énergie** de l'atome (voir 1<sup>ère</sup> S). On représente souvent les niveaux d'énergie par un diagramme (cf ci-contre).

Lorsque l'atome a l'énergie du niveau le plus bas, on dit qu'il est dans son **état fondamental**. S'il a une énergie d'un niveau plus élevé, il est dans un **état excité**.



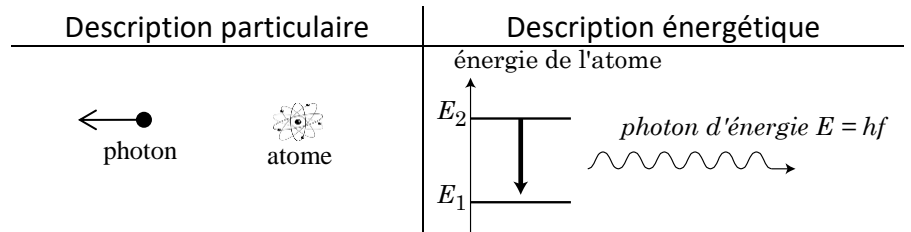
### C2- Absorption d'un photon par un atome

Un atome se trouve dans un état d'énergie  $E_1$  et intercepte un photon d'énergie  $E_{photon}$ . Si l'atome possède un niveau d'énergie  $E_2$  tel que  $E_{photon} = E_2 - E_1$ , alors il passe au niveau d'énergie  $E_2$  et **le photon est absorbé**.



### C3- Émission spontanée d'un photon par un atome

Si un atome se trouve dans un état excité d'énergie  $E_2$ , il peut se désexciter et retrouver un état d'énergie  $E_1 < E_2$  **en émettant spontanément un photon** d'énergie  $E_{photon} = E_2 - E_1$ .

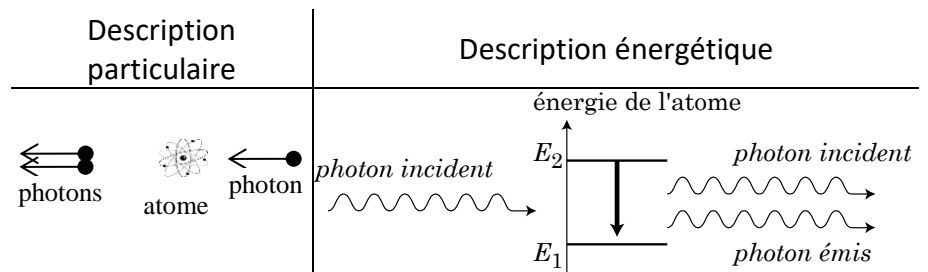


### C4- Émission stimulée

Si un atome se trouve dans un état excité d'énergie  $E_2$ , sa désexcitation vers un état d'énergie  $E_1 < E_2$  peut être **stimulée par un photon incident** d'énergie  $E_{photon} = E_2 - E_1$ . Ce photon incident n'est pas absorbé et un deuxième photon est émis.

Le deuxième photon émis :

- possèdent la même fréquence que le photon incident
- se propagent dans la même direction que le photon incident.



**La lumière LASER** : l'émission stimulée est à la base du principe de fonctionnement des lasers (activité 3).

Un faisceau laser possède des propriétés particulières :

- sa monochromaticité ;
- sa directivité ;
- sa cohérence spatiale et/ou temporelle (permettant de très grandes intensités lumineuses).

Toutes ces propriétés sont explicables à l'aide du modèle de l'émission stimulée et expliquent les applications nombreuses des lasers depuis leur invention en 1960.

### C5- Généralisation

Les atomes ne sont pas les seules entités qui échangent de l'énergie avec les photons. Les noyaux atomiques et les molécules, par exemple, possèdent eux aussi des niveaux d'énergie, peuvent échanger de l'énergie et peuvent absorber et/ou émettre des rayonnements.

Entité	noyau atomique	atome	molécule
Interaction mise en jeu	interactions entre nucléons	interaction noyau/électron	interactions entre atomes
Domaine de rayonnement	rayons $\gamma$	UV et visible	infrarouge

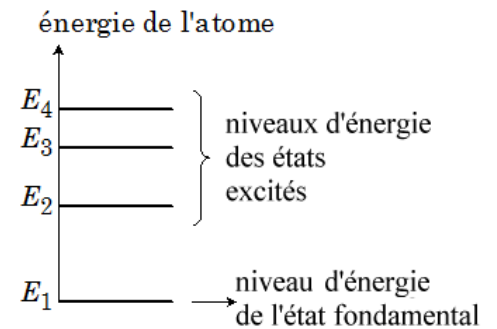


## C- Transferts quantiques d'énergie

### C1- Quantification de l'énergie des atomes

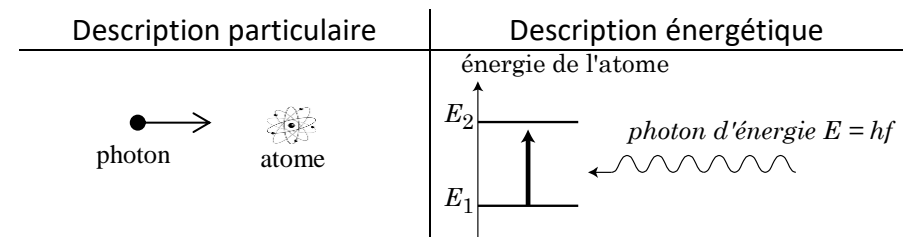
À l'échelle microscopique l'énergie ne satisfait pas les lois classiques vues dans les chapitres précédents. Elle est **quantifiée**, c'est-à-dire ne peut prendre que certaines valeurs discontinues appelées **les niveaux d'énergie** de l'atome (voir 1<sup>ère</sup> S). On représente souvent les niveaux d'énergie par un diagramme (cf ci-contre).

Lorsque l'atome a l'énergie du niveau le plus bas, on dit qu'il est dans son **état fondamental**. S'il a une énergie d'un niveau plus élevé, il est dans un **état excité**.



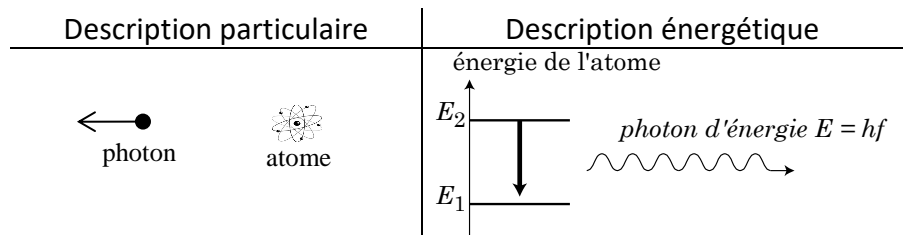
### C2- Absorption d'un photon par un atome

Un atome se trouve dans un état d'énergie  $E_1$  et intercepte un photon d'énergie  $E_{photon}$ . Si l'atome possède un niveau d'énergie  $E_2$  tel que  $E_{photon} = E_2 - E_1$ , alors il passe au niveau d'énergie  $E_2$  et **le photon est absorbé**.



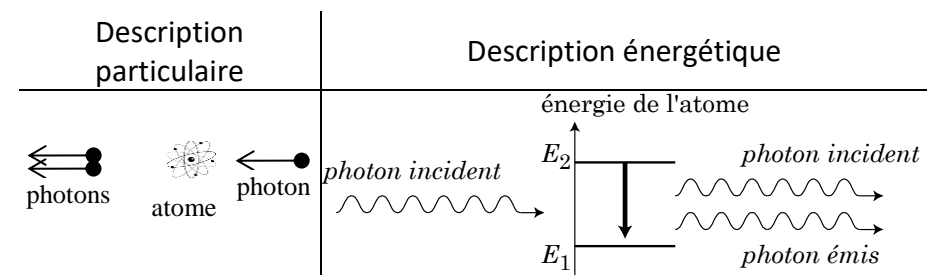
### C3- Émission spontanée d'un photon par un atome

Si un atome se trouve dans un état excité d'énergie  $E_2$ , il peut se désexciter et retrouver un état d'énergie  $E_1 < E_2$  **en émettant spontanément un photon** d'énergie  $E_{photon} = E_2 - E_1$ .



### C4- Émission stimulée

Si un atome se trouve dans un état excité d'énergie  $E_2$ , sa désexcitation vers un état d'énergie  $E_1 < E_2$  peut être **stimulée par un photon incident** d'énergie  $E_{photon} = E_2 - E_1$ . Ce photon incident n'est pas absorbé et un deuxième photon est émis.



Le deuxième photon émis :

- possèdent la même fréquence que le photon incident
- se propagent dans la même direction que le photon incident.

**La lumière LASER** : l'émission stimulée est à la base du principe de fonctionnement des lasers (activité 4).

Un faisceau laser possède des propriétés particulières :

- sa monochromaticité ;
- sa directivité ;
- sa cohérence spatiale et/ou temporelle (permettant de très grandes intensités lumineuses).

Toutes ces propriétés sont explicables à l'aide du modèle de l'émission stimulée et expliquent les applications nombreuses des lasers depuis leur invention en 1960.

### C5- Généralisation

Les atomes ne sont pas les seules entités qui échangent de l'énergie avec les photons. Les noyaux atomiques et les molécules, par exemple, possèdent eux aussi des niveaux d'énergie, peuvent échanger de l'énergie et peuvent absorber et/ou émettre des rayonnements.

Entité	noyau atomique	atome	molécule
Interaction mise en jeu	interactions entre nucléons	interaction noyau/électron	interactions entre atomes
Domaine de	rayons $\gamma$	UV et visible	infrarouge



<b>rayonnement</b>			
--------------------	--	--	--