

Modèle corpusculaire de la lumière : le photon

Introduction :

Quand on étudie la diffraction et l'interférence de la lumière, il s'avère clairement que la lumière est décrite comme une onde. Mais les expériences physiques se sont succédé au cours de l'histoire, et ont permis de clarifier un peu plus la nature de la lumière, qui s'est avérée plus complexe que ce que l'on pensait.

En réalité, la lumière a une dualité onde/corpuscule, c'est-à-dire qu'elle peut être décrite à la fois comme une onde mais aussi comme une particule.

Dans ce cours nous allons approfondir les connaissances sur cette dualité que nous avons acquises en classe de première, en commençant par un rappel sur les photons, particules responsables de l'aspect corpusculaire de la lumière, et leur interaction avec la matière. Puis, nous développerons l'effet photoélectrique, phénomène physique causé par des interactions photon-matière spécifiques. Enfin, nous exposerons quelques exemples d'application de ces interactions.

1 | La lumière est constituée de photons

a. Le photon et ses propriétés

À partir du postulat de [Planck](#), [Einstein](#) initie une théorie qui a depuis été prouvée par plusieurs observations expérimentales, et qui décrit **la lumière comme des « petits paquets » d'énergie, que l'on appelle photons.**



Définition

Photon :

Le photon est un *quantum* d'énergie (un « petit paquet ») associé au rayonnement électromagnétique et qui se comporte comme une particule élémentaire. Il peut interagir avec d'autres particules.



Un photon est caractérisé par :

- une masse nulle ;
- une charge nulle ;
- une vitesse égale à la célérité de la lumière dans le milieu considéré ;
- une énergie E qui est proportionnelle à la fréquence ν de l'onde et se calcule, en joule, par la **relation de Planck-Einstein** :

$$\begin{aligned} E &= h \times \nu \\ &= \frac{h \times c}{\lambda} \end{aligned}$$

Avec :

- h la constante de Planck valant $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$;
- ν la fréquence de l'onde électromagnétique en **Hz** ;
- c la célérité de la lumière dans le milieu considéré en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;
- λ la longueur d'onde de l'onde électromagnétique en **m**.



Exemple

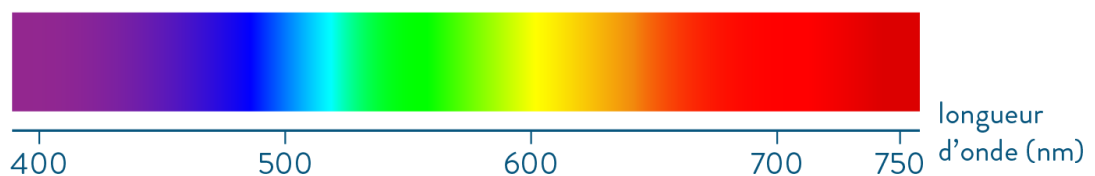
On considère une lumière monochromatique rouge, de longueur d'onde égale à $\lambda = 650 \text{ nm}$ qui se propage dans le vide.

1 Calculer l'énergie portée par un photon constituant cette lumière.

Sachant que la célérité de la lumière dans le vide est de $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, l'énergie E d'un tel photon est de :

$$\begin{aligned}
 E &= \frac{h \times c}{\lambda} \\
 &= \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,0 \times 10^8}{650 \times 10^{-9}} \\
 &= 3,1 \times 10^{-19} \text{ J}
 \end{aligned}$$

- 2 Un photon d'une lumière monochromatique bleue est-il plus ou moins énergétique qu'un photon d'une lumière monochromatique rouge ?



© SCHOOLMOUV

En observant le spectre de la lumière visible, on note que la longueur d'onde de la couleur rouge est plus grande que la longueur d'onde de la couleur bleue. Or, d'après la relation de Planck-Einstein, $E = \frac{h \times c}{\lambda}$,

l'énergie d'un photon est inversement proportionnelle à sa longueur d'onde.

Ainsi, un photon bleu est plus énergétique qu'un photon rouge.

Soit un photon ayant une énergie de 4,0 eV.

Rappel

Les énergies atomiques étant très faibles, on utilise une autre unité de mesure plus adaptée que le joule : l'électronvolt.

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

- 3 Calculer la fréquence de ce photon.

D'après la relation de Planck-Einstein :

$$E = h \times \nu$$

Nous avons ainsi :

$$\begin{aligned}\nu &= \frac{E}{h} \\ &= \frac{4 \times 1,6 \times 10^{-19}}{6,63 \times 10^{-34}} \\ &= 9,6 \times 10^{14} \text{ Hz}\end{aligned}$$

- 4 **Connaissant, maintenant, la fréquence de ce photon, à quel domaine électromagnétique appartient-il ?**

Calculons la longueur d'onde de ce photon :

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{c}{\nu} \\ &= \frac{3,0 \times 10^8}{9,6 \times 10^{14}} \\ &\approx 3,1 \times 10^{-7} \text{ m} \\ &\approx 310 \text{ nm}\end{aligned}$$

Ce photon appartient donc au rayonnement ultraviolet.



Le photon est la particule qui constitue la lumière. Il n'est pas chargé, n'a pas de masse et son énergie diminue quand sa fréquence diminue et quand sa longueur d'onde augmente.

b. Interaction photon-matière

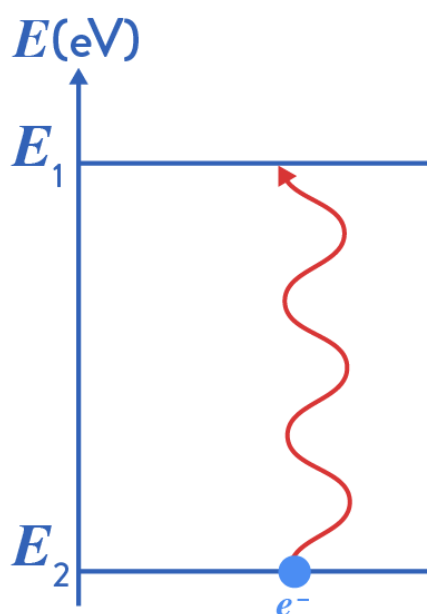
Une des propriétés atomiques les plus importantes, ayant mené au développement de la physique quantique, est l'organisation des électrons autour du noyau.

En 1913, **Niels Bohr** propose un modèle pour l'atome, en démontrant que les électrons ne sont pas répartis de manière aléatoire dans l'atome. Ils ne peuvent orbiter autour du noyau qu'à des niveaux d'énergie répartis. À chaque orbite sont associés un état et un niveau d'énergie quantifié :

- l'état de plus faible énergie est **l'état fondamental** et correspond à l'orbite électronique la plus proche du noyau ;
- les états d'énergie supérieurs sont les **états excités**. Plus un électron possède de l'énergie, plus il se trouve éloigné du noyau. À partir d'un certain niveau d'énergie, il quitte l'attraction du noyau.

Ainsi, en changeant de niveau d'énergie, un électron en orbite autour de son noyau opère une transition d'un état vers un autre. Il se produit alors une **émission** ou une **absorption** de lumière.

- 1 Quand un photon est envoyé sur un atome, l'atome l'absorbe. En d'autres termes, le photon transfère son énergie E à un électron de cet atome. Cette **absorption** d'énergie permet à l'électron de passer à un état plus excité que celui où il se trouvait initialement :



E_1 : état énergétique faible

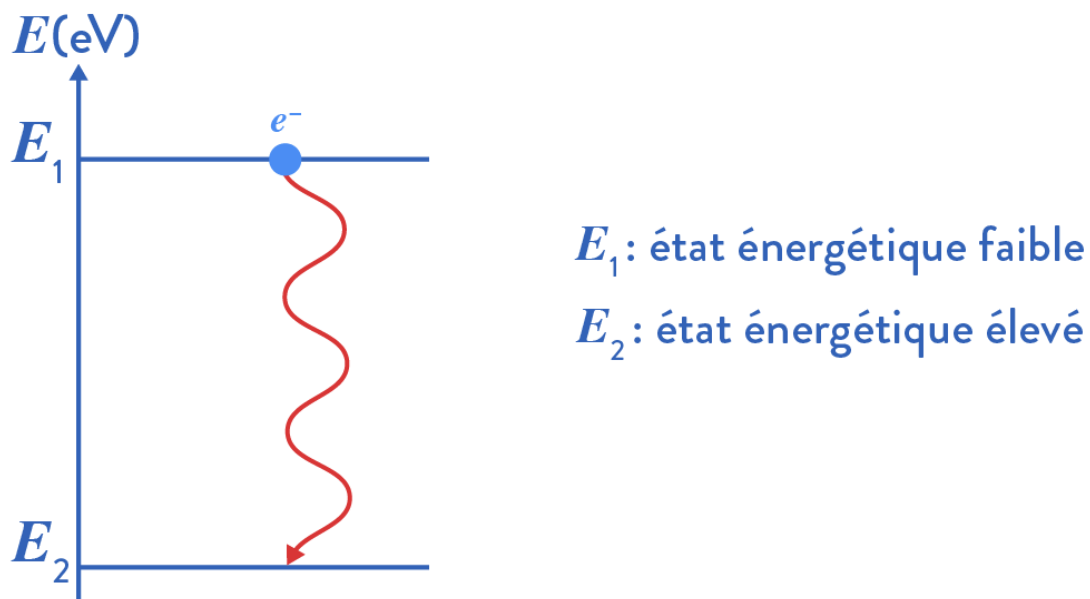
E_2 : état énergétique élevé

L'énergie du photon doit être exactement la différence d'énergie entre les deux états énergétiques :

$$E = E_2 - E_1$$

Avec E_2 et E_1 ($E_2 > E_1$) les énergies de deux niveaux d'énergie différents.

- 2 Quand un électron se trouve dans un état excité, d'énergie E_2 , il cherche à gagner en stabilité, c'est-à-dire à revenir à un état moins excité, d'énergie inférieure E_1 . Cette désexcitation a pour conséquence **l'émission** d'un photon d'énergie E :



© SCHOOLMOUV

Le photon émis aura une énergie égale à la différence d'énergie entre les deux états énergétiques :

$$E = E_2 - E_1$$

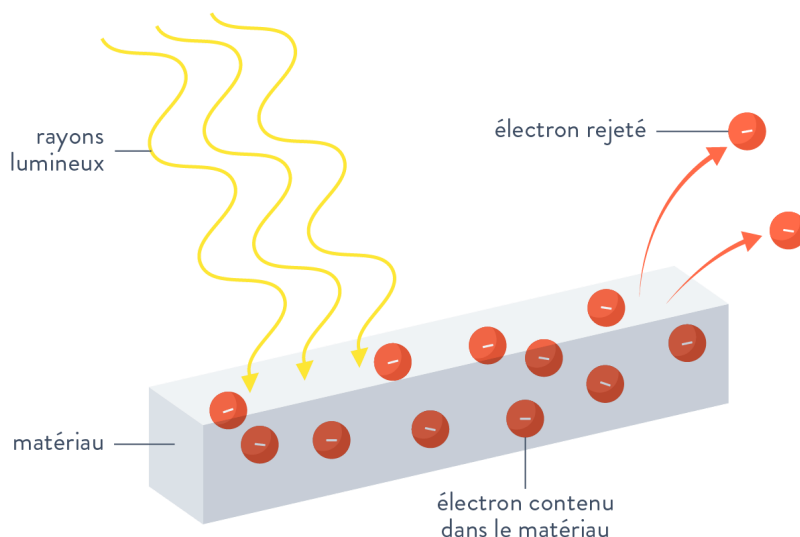
2 | L'effet photoélectrique

a. Observation de l'effet photoélectrique

En 1887, au cours de ses expériences, le physicien allemand **Heinrich Rudolf Hertz**, est le premier à comprendre et à expliquer un

phénomène physique très intéressant et très intrigant. En effet, il observe que lorsque certains matériaux sont soumis à des ondes électromagnétiques (lumière visible, UV ou IR), ils éjectent des électrons, et émettent donc un courant électrique. Ce phénomène physique avait été observé pour la première fois en 1839, par le physicien français [Edmond Becquerel](#).

Effet photoélectrique



© SCHOOLMOUV

Certains physiciens ont essayé d'expliquer ce phénomène, mais les connaissances en physique de l'époque ne permettaient pas la rationalisation des observations expérimentales. En effet, Hertz et ses contemporains considéraient la lumière **uniquement comme une onde électromagnétique**, incapable de transporter de la matière, mais simplement de la chauffer.

Une vingtaine d'années plus tard, en 1905, [Albert Einstein](#) développe, à partir des observations de Hertz, son hypothèse des **quanta** en considérant la lumière (visible ou non) comme un corps, c'est-à-dire constituée de particules possédant chacune une énergie. Ces particules sont nommées **photons** en 1926 par plusieurs physiciens qui ont adhéré à la théorie initiée par Einstein.

→ Ainsi, après la quantification, Einstein montre une approche de la physique quantique : la dualité onde/corpuscule de la lumière. Cette dualité permet, aujourd'hui, d'expliquer l'effet photoélectrique.

L'effet photoélectrique s'explique en considérant la lumière comme une onde et un corpuscule. Cette dualité de la nature de la lumière provient des théories d'Einstein.

b. Explication de l'effet photoélectrique par l'interaction photon-matière

L'effet photoélectrique s'observe quand l'énergie absorbée par l'électron est assez importante pour provoquer la libération quasi instantanément de l'électron. La circulation de ces électrons dans un circuit crée un courant électrique. Ainsi, l'effet photoélectrique est la création d'un courant électrique, lorsqu'un matériau (souvent métallique) est soumis à un rayonnement lumineux d'énergie $E > |E_1|$.

→ Quand un photon heurte un électron, il est absorbé par l'électron et lui **transmet toute son énergie**. Si cette énergie est suffisamment grande, une partie sera utilisée pour extraire l'électron de son atome, c'est ce qu'on appelle **le travail d'extraction**.



Travail d'extraction :

Le travail d'extraction W_{seuil} est une notion de mécanique quantique qui représente l'énergie minimale qu'il faut pour extraire un électron de son atome dans le matériau, c'est-à-dire pour casser les interactions électromagnétiques qui maintiennent l'électron dans son atome.

Pour observer un effet photoélectrique, il faut donc que l'énergie du photon incident soit supérieure ou égale au travail d'extraction et par conséquent que la fréquence des photons incidents soit supérieure ou égale à une **fréquence seuil** :

$$\nu_{\text{photon}} \geq \nu_0$$

Fréquence seuil :

La fréquence seuil ν_0 est caractéristique du matériau et dépend de l'énergie d'interaction électromagnétique qui maintient l'électron au sein de son atome dans le matériau.

Les électrons éjectés par effet photoélectrique sont expulsés avec une énergie cinétique (E_c). Ainsi, la loi de conservation de l'énergie induit que :

$$E_{\text{photon incident}} = W_s + E_c$$

Avec :

- $E_{\text{photon incident}}$ l'énergie du photon en J ;
- W_s le travail d'extraction en J ;
- E_c l'énergie cinétique acquise par l'électron en J.

 Rappel

L'énergie cinétique est l'énergie que possède un objet en mouvement et se calcule par :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

Ainsi l'énergie cinétique de l'électron éjecté se calcule par :

$$\begin{aligned} E_c &= E_{\text{photon incident}} - W_s \\ &= h \times \nu_{\text{photon incident}} - W_s \\ &= \frac{1}{2}m_e v_e^2 \end{aligned}$$

L'énergie cinétique des électrons est donc dépendante de la fréquence du photon incident.

Reprenons le photon considéré plus haut avec une énergie de $4,0 \text{ eV}$.

Est-il capable d'extraire un électron d'une plaque de cuivre ($W_s = 7,53 \times 10^{-19} \text{ J}$) ?

En sachant que $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$, nous pouvons convertir l'énergie du photon en joule, ce qui nous donne :

$$\begin{aligned} E_{\text{photon incident}} &= 4,0 \times 1,6 \times 10^{-19} \\ &= 6,4 \times 10^{-19} \text{ J} \end{aligned}$$

Ainsi $E_{\text{photon incident}} < W_s$.

Ce photon est donc incapable d'extraire un électron à la plaque de cuivre.

3 | Applications de l'interaction photon-matière

a. L'interaction photon-matière dans divers domaines

La capacité qu'a la matière à absorber des photons est utilisée aujourd'hui dans divers domaines d'applications :

- dans le monde de la recherche, l'interaction photon-matière est à la base des **spectrométrie UV-Visible ou IR**, une méthode très utilisée pour l'analyse des molécules.
- dans la médecine, cette interaction est la base de l'**imagerie par résonance magnétique** (IRM) ;
- dans notre **quotidien**, avec des télécommandes qui permettent d'ouvrir des portails à distance ;
- dans l'électronique, l'interaction photon-matière est à la base du fonctionnement des **capteurs de lumière**. Ces petits capteurs présents dans nos téléphones permettent, par exemple, de réguler la luminosité de l'écran selon la luminosité ambiante.



Les panneaux photovoltaïques

Mais l'une des applications importantes de l'interaction photon-matière est les **cellules photovoltaïques**, répondant ainsi à l'enjeu environnemental le plus critique : l'enjeu énergétique. Elles forment l'une des sources d'énergie renouvelable.

Les **panneaux photovoltaïques**, souvent installés dans des champs ensoleillés ou sur les toits, sont constitués de **cellules photovoltaïques**. Elles permettent de transformer les rayons lumineux du Soleil en électricité par **effet photoélectrique**. En effet, les matériaux (ex : silicium) constituant ces cellules sont capables d'absorber des photons d'une certaine énergie et d'émettre des électrons dans un circuit électrique, créant ainsi un courant.

→ Ce sont plus exactement les rayons UV émis par le Soleil qui sont capables d'arracher des électrons aux cellules photovoltaïques.



À retenir

Les cellules photovoltaïques absorbent donc des rayonnements lumineux avec une **puissance lumineuse** P_l , et la transforment en **puissance électrique** P_e .



Rappel

La **puissance lumineuse** a pour formule :

$$P_l = E \times S$$

Avec :

- E l'éclairement de la cellule en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$;
- S la surface de la cellule en m^2 .

La **puissance électrique** a pour formule :

$$P_e = I \times U$$

Avec :

- I l'intensité en A ;
- U la tension en V.

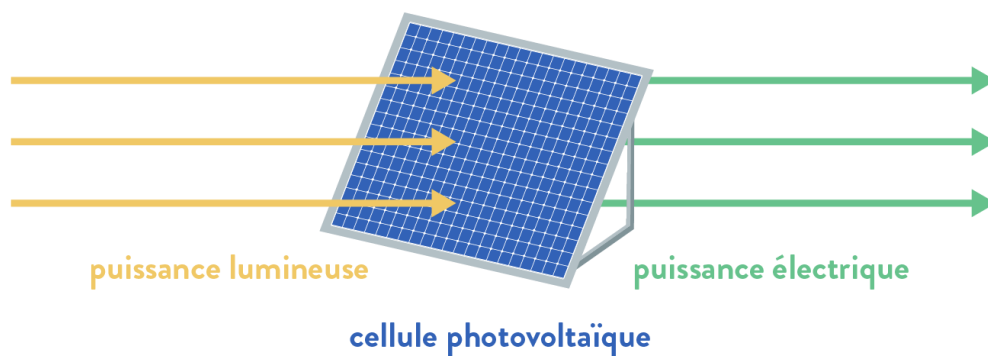


À retenir

Le **rendement** η d'une cellule photovoltaïque est le rapport de la puissance électrique maximale P_e produite par la cellule par la puissance lumineuse P_l reçue :

$$\eta = \frac{P_e}{P_l}$$

η le rendement peut s'exprimer en pourcentage.



© SCHOOLMOUV

Le rendement actuel des panneaux solaires est compris entre 7 % et 25 %.

Conclusion :

Depuis les travaux initiés par Einstein sur l'aspect corpusculaire de la lumière, on sait que cette dernière est constituée de photons. Les photons sont des paquets d'énergie capable d'être absorbés par la matière en lui transmettant l'intégralité de leur énergie. Si leur énergie est assez élevée, les photons sont capables d'arracher des électrons à certains matériaux et de créer un courant électrique, c'est l'effet photoélectrique. Une des plus importantes applications de l'effet photoélectrique est le fonctionnement des panneaux photovoltaïques.