

Thème : Former des images
Cours 23 : La lumière : Un flux de photons
(version professeur)

B.O. Le photon : énergie, vitesse, masse. Effet photoélectrique. Travail d'extraction.

Décrire l'effet photoélectrique, ses caractéristiques et son importance historique. Interpréter qualitativement l'effet photoélectrique à l'aide du modèle particulaire de la lumière. Établir, par un bilan d'énergie, la relation entre l'énergie cinétique des électrons et la fréquence. Expliquer qualitativement le fonctionnement d'une cellule photoélectrique.

Absorption et émission de photons. Enjeux énergétiques : rendement d'une cellule photovoltaïque.

I. Énergie du photon. Rappels de première.

Chaque photon transporte une énergie $E = h.f$ E s'exprime en Joule

f est la fréquence (Hz)

h est une constante universelle appelée constante de Planck. $h = 6,626 \times 10^{-34}$ J.s

Autre expression de l'énergie transportée par un photon :

La fréquence est l'inverse de la période T or $T = \frac{\lambda}{c}$ donc $\nu = \frac{c}{\lambda}$ e alors $E = \frac{hc}{\lambda}$

λ s'exprime en mètre (m).

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

Exemple de calcul d'énergie transportée par un photon :

Un photon « rouge » a une longueur d'onde $\lambda = 700$ nm.

Il se déplace à la vitesse de la lumière $c = 3,00 \times 10^8$ m.s⁻¹

Question : Déterminer la valeur de l'énergie transportée par ce photon (en joule).

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,626 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{700 \times 10^{-9}} = 2,84 \times 10^{-19} \text{ J}$$

On constate que la valeur est très petite.

Les physiciens utilisent une autre unité pour les énergies transportées par des particules : l'électron-volt (eV).

Un électron-volt est l'énergie d'un électron soumis à une tension de 1,0 V.

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

Question : Déterminer la valeur de l'énergie transportée par ce photon (en eV).

$$E = \frac{2,84 \times 10^{-19}}{1,60 \times 10^{-19}} = 1,77 \text{ eV}$$

II. Echange d'énergie avec un photon. Rappels de première.

Niels Bohr en 1913 émis les hypothèses suivantes :

L'énergie de l'électron est fixée et ne prend que des valeurs précises (on dit qu'elle est quantifiée).

Les radiations ne sont émises ou absorbées que si un électron passe d'une orbite à l'autre. (**Transition électronique**).

Par convention, les énergies des électrons sur les différentes orbites sont négatives.

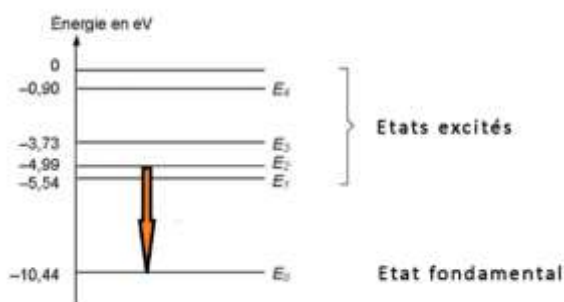
Par convention, L'énergie de l'électron situé sur la plus basse orbite a la valeur la plus négative. On appelle cet état, **l'état fondamental** E_0 . Dans cet état, l'électron est particulièrement stable car très lié au noyau.

Quand les électrons sont sur des orbites plus éloignées du noyau, ils sont dans des **états excités**. Leurs niveaux énergies ont des valeurs comprises entre E_0 et 0.

Ces niveaux d'énergie sont **quantifiés**, c'est-à-dire qu'ils ont des valeurs discrètes (discontinues).

Un électron qui n'est plus rattaché au noyau a une énergie égale à 0.

Exemple de schéma représentant les niveaux énergies des électrons sur les différentes orbites de l'atome de mercure.



Question : Dans le cas du schéma ci-dessus, un photon est-il émis ou absorbé par l'atome ?

Réponse :

L'électron passe d'un niveau excité (riche en énergie) au niveau fondamental (de plus basse énergie), alors il libère de l'énergie sous la forme d'un photon. Un photon est donc émis.

Question : Déterminer la valeur de l'énergie du photon (en eV) et de sa longueur d'onde ? Cette radiation est-elle visible ?

Réponse :

$$\Delta E = E_{\text{final}} - E_{\text{initial}} = -10,44 - (-4,99) = -5,45 \text{ eV}$$

La valeur est négative car il s'agit d'énergie émise vers l'extérieur du système.

$$\lambda = \frac{hc}{|E|} = \frac{6,626 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{5,45 \times 1,60 \times 10^{-19}} = 2,28 \times 10^{-7} \text{ m} = 228 \text{ nm}$$

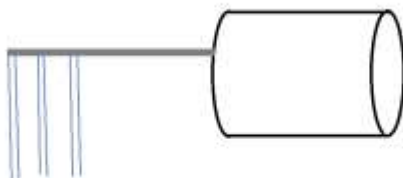
Cette radiation appartient au domaine des ultraviolets $\lambda < 400 \text{ nm}$. Elle n'est donc pas visible.

III. L'effet photoélectrique. Expérience de Hertz (1887).

1. Analyse d'une expérience reposant sur le principe de l'expérience de Hertz

Vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=WO38qVDGgqw>

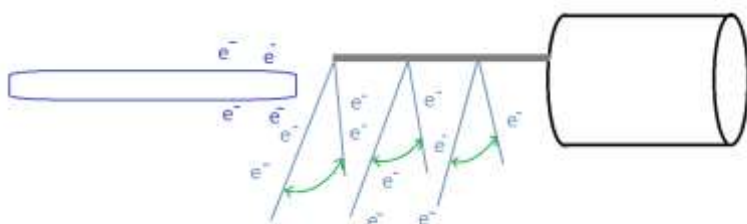
Schéma du montage : Sur une canette en aluminium (métal conducteur) est fixée une tige métallique (conductrice). Sur cette tige des lamelles métalliques pendent.



Etape 1 : un bâton en plastique est frotté avec un papier. Il se charge négativement. Des électrons ont été déposés à sa surface. Le bâton est approché des lamelles métalliques.

Question : Observer et interpréter

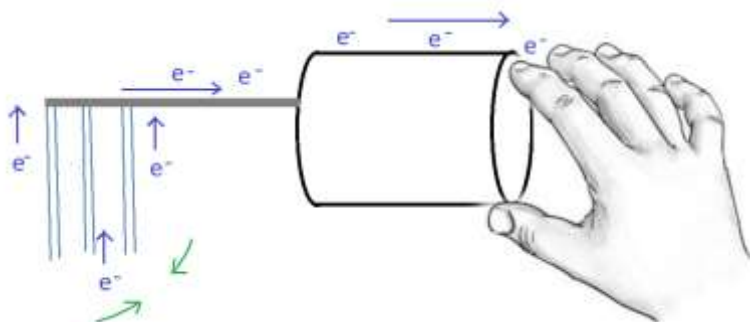
Réponse : On observe que les lamelles s'écartent. Les électrons du bâton ont été transmis aux lamelles qui possèdent des charges de même signe. Elles s'écartent.



Etape 2 : l'expérimentateur touche la canette.

Question : Observer et interpréter

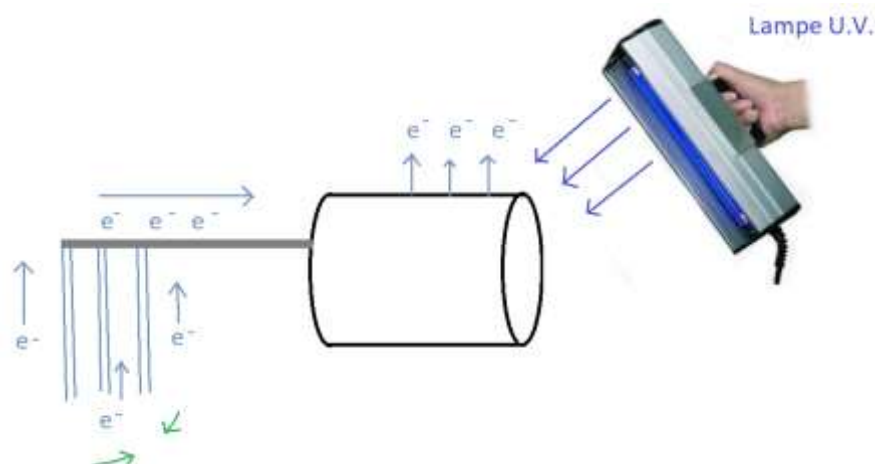
Réponse : On observe que les lamelles retrouvent leur position initiale quand l'expérimentateur touche la canette. Les électrons des lamelles ont migrés vers la main. Les lamelles se sont déchargées.



Etape 3 : L'expérimentateur recharge les lamelles et approche une lampe émettant des U.V.

Question : Observer et interpréter

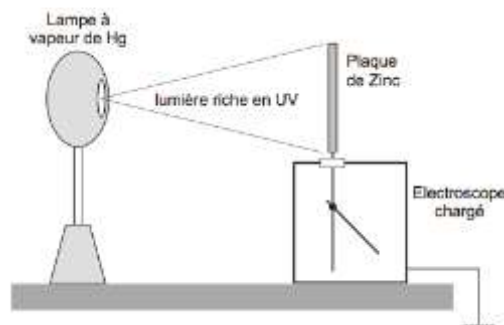
Réponse : On observe que les lamelles retrouvent leur position initiale quand l'expérimentateur touche la canette. Des électrons de la canette ont été arrachés. Les électrons présents sur les lamelles ont également migré vers la canette pour compenser cette perte. Les lamelles sont ainsi déchargées.



Conclusion : Les électrons ont captés suffisamment d'énergie pour être éjectés du métal. Ce phénomène est appelé effet photoélectrique.

2. Expérience historique de Hertz sur l'effet photoélectrique.

En 1886, Heinrich **Hertz** réalise l'expérience intitulée « effet photoélectrique » : une plaque de zinc, découpée, montée sur un électroscope est chargée, puis éclairée par la lumière émise par une lampe à vapeur de mercure (émettant un rayonnement riche en UV, visible et IR) ou par une lampe à UV.



Etude de deux étapes de cette expérience :

1^{ère} étape : Initialement la plaque de zinc et l'électroscope sont chargés négativement : l'aiguille de l'électroscope dévie. Puis la plaque de zinc est éclairée. L'aiguille revient alors dans sa position initiale.

Interprétation :

Lorsque la plaque de zinc est éclairée, l'énergie absorbée par les électrons leur permet d'être éjectés de la plaque métallique. La plaque se décharge, ainsi que l'aiguille, qui revient dans sa position initiale.

2^{ème} étape : La plaque de zinc est rechargée négativement, l'aiguille de l'électroscope dévie à nouveau. On éclaire à nouveau la plaque mais en interposant entre la source lumineuse et la plaque de zinc, une plaque de verre. On observe que l'aiguille reste dans sa position.

Interprétation :

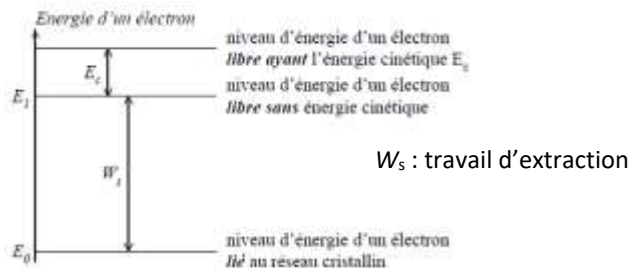
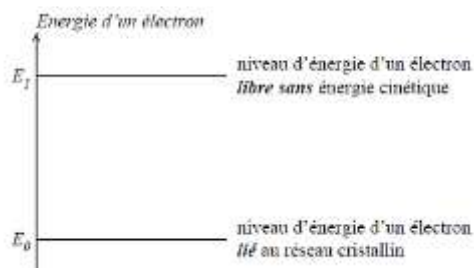
La plaque de verre ne laisse pas passer les radiations ultraviolettes. Les électrons ne sont donc pas arrachés au métal.

1.2. Conclusion de l'expérience de Hertz.

Heinrich Hertz a alors découvert que la lumière ultraviolette provoque l'émission d'électrons à partir d'une surface métallique comme le zinc. On peut alors se demander comment on peut extraire un électron d'un métal :

Un métal est constitué par un réseau cristallin d'ions positifs entre lesquels circulent des électrons liés au réseau, mais libres de se déplacer à l'intérieur de ce réseau.

- A l'aide du diagramme énergétique d'un électron, proposer une explication à l'effet photoélectrique. Quelle énergie minimale doit recevoir un électron pour être libéré ?



Le diagramme énergétique illustre que :

- C'est à l'intérieur du métal que l'électron a le moins d'énergie, car il est lié au réseau ;
- Lorsque l'électron a capté l'énergie $E = W_s$, il est sorti du métal, mais il est au repos ($E_c = 0$) ;
- Lorsque l'électron a capté une énergie $E > W_s$, il est sorti du métal et a une énergie cinétique $E_c = E - W_s$.

Le travail d'extraction W_s est l'énergie minimale que doit recevoir un électron pour être libéré.

Expérience A : On utilise maintenant le même faisceau lumineux, mais de plus forte intensité lumineuse, c'est-à-dire que le nombre de photons heurtant la plaque de zinc est plus élevé.

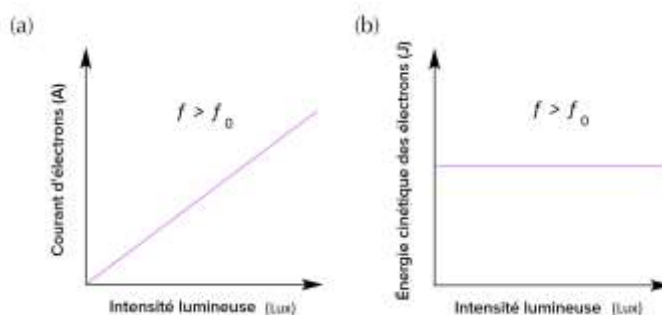
On mesure l'énergie cinétique des électrons émis et le courant électrique correspondant au nombre d'électrons émis.

Observation : Graphiques ci-contre.

Interprétation :

Le courant d'électrons est proportionnel à l'intensité lumineuse reçue par la plaque.

Par contre l'énergie cinétique des électrons est indépendante de l'intensité lumineuse reçue.



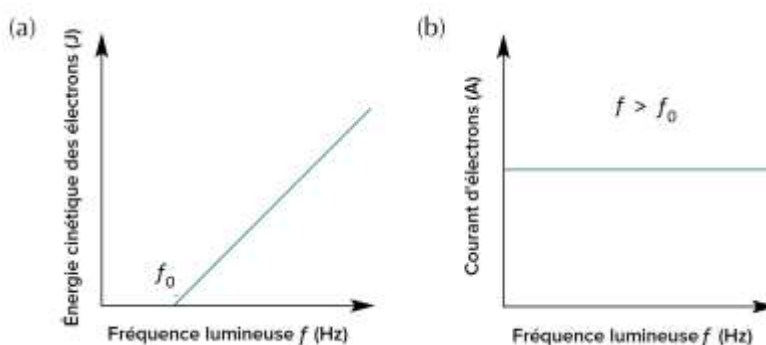
Expérience B : On utilise maintenant un faisceau lumineux, de fréquence plus élevée, mais de même intensité lumineuse que le faisceau lumineux initial.

Observation : Graphique ci-contre.

Interprétation :

On constate que plus la fréquence de la radiation lumineuse reçue par la plaque est élevée, c'est-à-dire que sa longueur d'onde est plus faible, plus l'énergie cinétique des électrons est élevée.

Par contre le nombre d'électrons émis est indépendant de la fréquence de la radiation lumineuse reçue par la plaque.



Conclusion de ces expériences :

Si on éclaire une plaque métallique avec une lampe d'intensité plus élevée, il y aura plus d'électrons émis, par contre leur énergie ne sera pas plus élevée.

Si on éclaire une plaque métallique avec une lampe émettant une lumière de fréquence plus élevée, c'est-à-dire de longueur d'onde plus courte, l'énergie des électrons éjectés sera plus élevée, par contre il n'y aura pas plus d'électrons éjectés.

Pour expliquer l'effet photoélectrique, il faut renoncer au modèle ondulatoire de la Physique Classique et recourir au modèle corpusculaire de la lumière (hypothèse d'Einstein, 1905).

Chaque photon transporte l'énergie $E = h \cdot f$ où h représente la constante de Planck.

IV. Conditions pour lesquelles on pourra observer un effet photoélectrique avec le métal nickel Ni.

Le travail d'extraction (de sortie) du nickel Ni est égal à $W_s = 4,60 \text{ eV}$.

Si on éclaire ce métal avec une lumière de fréquence égale à $f = 4,50 \times 10^{16} \text{ Hz}$, pourra-t-on observer l'effet photoélectrique ?

Et si oui, quelle sera la valeur de la vitesse des électrons éjectés ?

Données :

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

$$\text{Masse d'un électron : } m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$\text{Constante de Planck : } h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

Méthode :

- Détermination de l'énergie du photon incident.

$$E = h \cdot f = 6,626 \times 10^{-34} \times 4,50 \times 10^{16} = 2,98 \times 10^{-17} \text{ J}$$

$$\text{Soit } E = \frac{2,98 \times 10^{-17}}{1,60 \times 10^{-19}} = 186 \text{ eV}$$

$$\text{ou calcul du travail de sortie en Joule : } W_s = 4,60 \times 1,60 \times 10^{-19} = 7,36 \times 10^{-19} \text{ J} \quad \Rightarrow E > W_s$$

- Comparaison de l'énergie du photon avec la valeur du travail d'extraction du nickel. Conclusion.

Pour éjecter des électrons, il faut que l'énergie des photons soit plus grande que le travail d'extraction du Nickel.

$$E = 186 \text{ eV} \text{ et } W_s = 4,6 \text{ eV} \quad \Rightarrow E > W_s$$

$$\text{ou calcul du travail de sortie en Joule : } W_s = 4,6 \times 1,60 \times 10^{-19} = 7,36 \times 10^{-19} \text{ J} \text{ et } E = 2,98 \times 10^{-17} \text{ J} \quad \Rightarrow E > W_s$$

Alors les électrons peuvent être éjectés avec une énergie cinétique non nulle.

- Détermination de l'énergie cinétique d'un électron éjecté.

$$E_c = E - W_s = 2,98 \times 10^{-17} - 7,36 \times 10^{-19} = 2,91 \times 10^{-17} \text{ J}$$

- Détermination de la vitesse d'un électron éjecté.

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

$$\Leftrightarrow v = \sqrt{\frac{2E_c}{m}}$$

$$\Leftrightarrow v = \sqrt{\frac{2 \times 2,91 \times 10^{-17}}{9,11 \times 10^{-31}}}$$

$$\Leftrightarrow v = 8,00 \times 10^6 \text{ m.s}^{-1}$$

V. Application de l'effet photoélectrique : les panneaux solaires photovoltaïques. (voir TP).

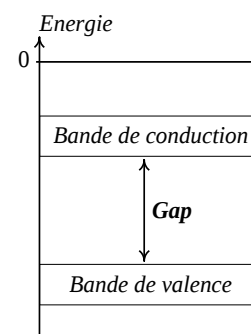
Le soleil est une source d'énergie inépuisable, l'exploitation de son rayonnement pour produire de l'électricité a été possible par la compréhension de l'effet photoélectrique : un panneau photovoltaïque convertit une partie de l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique.

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour la fabrication de panneaux photovoltaïques. Il fait partie de la famille des matériaux semi-conducteurs dont le diagramme d'énergie des électrons est du type schématisé ci-contre.

En effet, en physique du solide, les bandes de valence et de conduction modélisent des valeurs d'énergie que peuvent prendre les électrons d'un semi-conducteur à l'intérieur de celui-ci. De façon générale, ces électrons n'ont la possibilité de prendre que des valeurs d'énergie comprises dans certains intervalles, lesquels sont séparés par des "bandes" d'énergie interdites. Cette modélisation conduit à parler de **bandes d'énergie**.

La *bande de valence* est la dernière bande de basse énergie contenant des électrons.

La *bande de conduction* est la première bande de haute énergie vide d'électrons.



Pour le silicium, l'énergie nécessaire (*Gap*) pour faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction est de 1,12 eV.

Questions :

1. Calculer la fréquence minimale du rayonnement permettant de faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction.

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

Constante de Planck : $h = 6,626 \times 10^{-34}$ J.s

$$E = h \cdot f$$

$$\Leftrightarrow f = \frac{E}{h}$$

$$\Leftrightarrow f = \frac{1,12 \times 1,60 \times 10^{-19}}{6,626 \times 10^{-34}}$$

$$\Leftrightarrow f = 2,70 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

2. A quels rayonnements, les panneaux photovoltaïques en silicium sont-ils sensibles ?

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

$$\Leftrightarrow \lambda = \frac{c}{f}$$

$$\Leftrightarrow \lambda = \frac{3,00 \times 10^8}{2,70 \times 10^{14}}$$

$$\Leftrightarrow \lambda = 1,11 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$\Leftrightarrow \lambda = 1\,111 \text{ nm}$$

Les panneaux photovoltaïques en silicium sont particulièrement sensibles aux I.R ($\lambda > 780 \text{ nm}$)

Classe inversée : Expliquer en quelques lignes le principe de fonctionnement d'une application actuelle mettant en jeu l'interaction photon-matière parmi les applications suivantes : capteurs de lumière, cellules photovoltaïques, diodes électroluminescentes, spectroscopies UV-visible et IR.