

- 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.
- Citer quelques applications actuelles mettant en jeu l'interaction photon-matière (capteurs de lumière, cellules photovoltaïques, DEL, spectroscopies UV-visible et IR, etc.).

## Chapitre 20

# Effet photoélectrique et enjeux énergétiques

### I. Energie du photon (Rappels de première)

Chaque photon transporte une énergie :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$E$  s'exprime en Joule)  
 $\nu$  est la fréquence (Hz)  
 $h$  est une constante universelle appelée constante de Planck.  $h = 6,626 \times 10^{-34}$  J.s  
 $\lambda$  s'exprime en mètre (m)  
 $c$  est la célérité de la lumière dans le vide.  $c = 3,00 \times 10^8$  m.s<sup>-1</sup>

Question : 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<sup>-1</sup>. Déterminer la valeur de l'énergie transportée par ce photon en joule puis en eV.

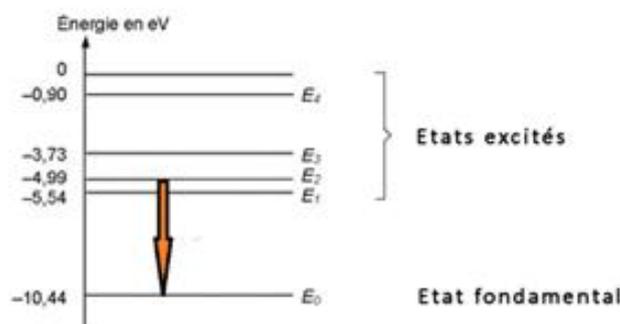
Les physiciens utilisent une autre unité pour les énergies transportées par des particules : l'électron-volt (eV). Un électron-volt est l'énergie d'un électron soumis à une tension de 1,0 V. **1 eV = 1,60 × 10<sup>-19</sup> J**

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

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

- 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.
- 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 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.
- Un **photon** est une particule élémentaire de **masse nulle**, il se déplace à la **vitesse de la lumière**.

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 :

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

Réponse :

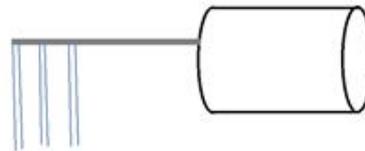
### III. Expérience de Hertz (1887)

#### III.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).

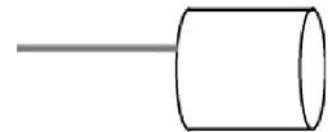
Sur cette tige des lamelles métalliques pendent.



**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:

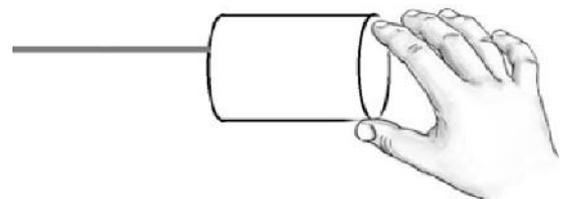
Réponse :



**Etape 2** : l'expérimentateur touche la canette.

Question : Observer et interpréter:

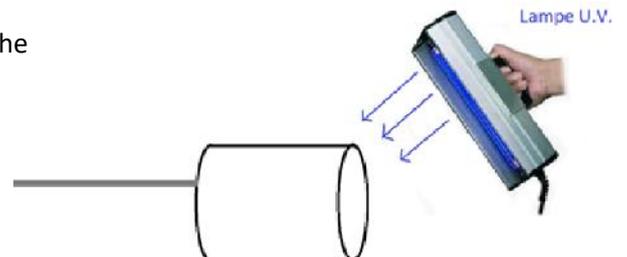
Réponse :



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

Question : Observer et interpréter:

Réponse :



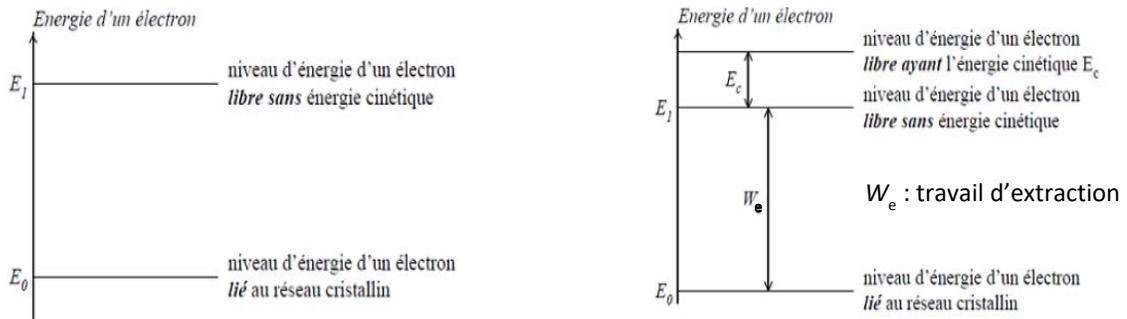
Conclusion : Les électrons ont captés suffisamment d'énergie pour être éjectés du métal. Ce phénomène est appelé effet photoélectrique.

### III.2 Conclusion de l'expérience de Hertz :

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. A l'aide du diagramme énergétique d'un électron, on propose une explication à l'effet photoélectrique.

Question : 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  $E = W_e$ , il est sorti du métal, mais il est au repos ( $E_c = 0$ ) ;
- Lorsque l'électron a capté une énergie  $E > W_e$ , il est sorti du métal et a une énergie cinétique  $E_c = E - W_e$ .

Réponse :

## IV. L'effet photoélectrique. Expérience de Hertz

### IV.1 Définition :

Lorsqu'un métal est soumis à un rayonnement électromagnétique de fréquence  $\nu$  (en Hz), supérieure à une certaine fréquence caractéristique du métal, appelée **fréquence seuil**  $\nu_s$  (en Hz), alors l'énergie  $E = h\nu$  d'un photon permet d'arracher un électron à un atome de ce métal.

Il y a donc conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique.

### IV.2 Travail d'extraction :

Le **travail d'extraction**, noté  $W_e$  (en J), correspond à l'énergie minimale apportée par un photon pour arracher un électron à l'atome métallique.

$$W_e = h\nu_s$$

$W_e$  le travail d'extraction (en J)  
 $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  J.s la constante de Planck  
 $\nu_s$  la fréquence seuil du métal (en Hz)

L'énergie du photon incident est transférée à l'électron pour l'extraire du métal et éventuellement lui permet d'acquérir une vitesse

$$E_{\text{photon}} = W_e + E_c$$

### IV.3 Énergie cinétique de l'électron :

Une fois arraché à l'atome, l'électron possède une **énergie cinétique**  $E_c$  (en J), correspondant à la différence entre l'énergie  $h\nu$  apportée par le photon et le travail d'extraction  $W_e$  cédé pour arracher l'électron :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 = E - W_e = h(\nu - \nu_s)$$

$E_c$  en joules (J)  
 $m = 9,11 \times 10^{-31}$  kg : masse de l'électron  
 $v$  en mètres par seconde ( $m \cdot s^{-1}$ )  
 $\nu$  et  $\nu_s$  en hertz (Hz)  
 $h = 6,63 \times 10^{-34}$  J·s : constante de Planck

Une source ultraviolette de fréquence  $\nu = 1,2 \times 10^{15}$  Hz est braquée vers une plaque de zinc de fréquence seuil  $\nu_s = 8,0 \times 10^{14}$  Hz.

Les électrons émis ont une énergie cinétique :

$$E_c = h(\nu - \nu_s) = 6,63 \times 10^{-34} \times (1,2 \times 10^{15} - 8,0 \times 10^{14}) = 2,7 \times 10^{-19} \text{ J.}$$

### IV.4 Cellule photoélectrique :

Une **cellule photoélectrique** permet de convertir l'énergie d'un rayonnement lumineux en énergie électrique. Elle est composée d'un circuit comprenant un générateur qui applique une certaine tension entre la cathode et l'anode d'une ampoule à vide. Lorsque l'on éclaire la cathode, si la fréquence du rayonnement est supérieure à la fréquence seuil du métal la constituant, alors des électrons sont émis et accélérés d'une force électrique  $\vec{F} = -e\vec{E}$ , où  $\vec{E}$  est le champ électrique régnant entre la cathode et l'anode. On génère ainsi un courant électrique.

## V. Autres applications

### V.1 Effet photovoltaïque :

L'**effet photovoltaïque**, semblable à l'effet photoélectrique, repose sur l'utilisation de matériaux appelés **semi-conducteurs**. Dans un solide, les électrons se situent sur des couches électroniques qui possèdent un certain niveau d'énergie. Les niveaux accessibles en théorie pour un type d'atomes sont appelés les états électroniques. La différence entre un métal conducteur, un semi-conducteur et un isolant repose sur l'écart énergétique qui existe entre la bande dite de valence (valeurs d'énergie des états fondamentaux des électrons) et le bande dite de conduction (états excités théoriquement accessibles par les électrons).

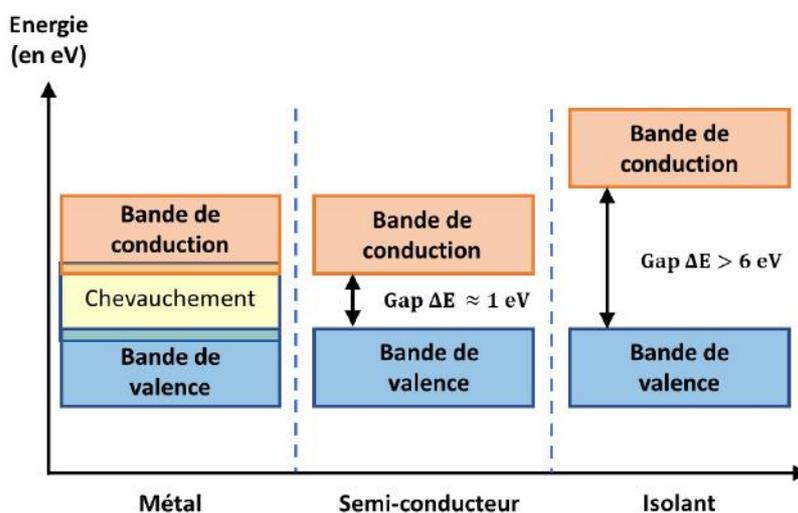


Diagramme illustrant la différence entre les niveaux d'énergie pour un métal, un semi-conducteur et un isolant.

Pour un métal, la bande de valence et celle de conduction se chevauchent, assurant un libre passage des électrons de l'une à l'autre. Pour un isolant, le gap énergétique entre les deux bandes est trop grand pour que l'on puisse faire passer un électron de sa bande de valence à sa bande de conduction.

Pour les semi-conducteurs, le gap énergétique est relativement faible. Ainsi, à l'état naturel, les semi-conducteurs se comportent comme des isolants. Mais lorsqu'on leur apporte une énergie lumineuse suffisante, les électrons peuvent s'exciter et atteindre la bande de valence dans laquelle ils vont pouvoir circuler d'un atome à l'autre. Le matériau devient conducteur : c'est l'**effet photovoltaïque**.

Conclusion: **Lorsqu'on éclaire un semi-conducteur avec un rayonnement électromagnétique d'énergie suffisante, un courant électrique s'installe dans le matériau : c'est l'effet photovoltaïque.**

## **V.2 Rendement d'une cellule photovoltaïque :**

Les panneaux photovoltaïques utilisent l'énergie lumineuse provenant du Soleil pour la convertir en électricité.

Le **rendement  $\eta$**  d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre la puissance électrique délivrée par la cellule  $P_{él}$  (en W) et la puissance lumineuse reçue  $P_l$ .

$$\eta = \frac{P_{él}}{P_l}$$

## **V.3 Diode électroluminescente (DEL) :**

Une **diode électroluminescente** (DEL) fonctionne à l'inverse de la cellule photovoltaïque : les électrons, qui se désexcitent pour revenir à leur état fondamental dans la bande de valence, émettent un photon lumineux. Il y a **conversion d'énergie électrique en énergie lumineuse**.