

Effet photoélectrique

TERMINALE

1 Le photon

Définition

La lumière peut être décrite comme un flux de **photons**, particules d'énergie

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

avec $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J s (constante de Planck), $c = 3,00 \times 10^8$ m/s, ν en Hz et λ en m.

Propriété

Le photon se déplace toujours à la **célérité de la lumière** c dans le vide, et sa **masse est nulle**. Il ne peut ni ralentir, ni s'arrêter : il est émis, puis absorbé — et disparaît alors en cédant *toute* son énergie.

$h = 6,63 \times 10^{-34}$ J s ; $c = 3,00 \times 10^8$ m/s ; charge élémentaire $e = 1,60 \times 10^{-19}$ C ; masse de l'électron $m_e = 9,11 \times 10^{-31}$ kg. Conversion : 1 eV = $1,60 \times 10^{-19}$ J.

Méthode — Énergie d'un photon

Calculer l'énergie d'un photon de lumière verte, $\lambda = 500$ nm.

1. En joules :

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{500 \times 10^{-9}} = 3,98 \times 10^{-19} \text{ J}$$

2. En électronvolts, unité bien plus commode à cette échelle :

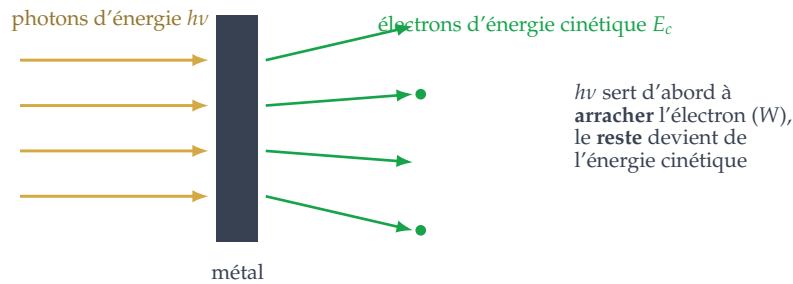
$$E = \frac{3,98 \times 10^{-19}}{1,60 \times 10^{-19}} = 2,49 \text{ eV}$$

3. Ordre de grandeur à retenir : un photon visible transporte **1 à 3 eV**. Un photon UV en transporte davantage, un photon infrarouge moins.

2 L'effet photoélectrique

Définition

L'**effet photoélectrique** est l'**éjection d'électrons** d'un métal éclairé par un rayonnement électromagnétique.



Propriété

Les trois observations que la théorie ondulatoire ne peut pas expliquer :

- il existe une **fréquence seuil** ν_0 en dessous de laquelle *aucun* électron n'est éjecté, même avec une lumière très intense ;
- au-dessus du seuil, l'effet est **instantané**, même avec une lumière très faible ;
- augmenter l'**intensité** lumineuse augmente le *nombre* d'électrons éjectés, mais **pas** leur énergie cinétique — seule la *fréquence* la fait varier.

Importance historique. Une onde continue devrait pouvoir accumuler progressivement assez d'énergie pour arracher un électron, quelle que soit sa fréquence : le seuil est inexplicable. Einstein le résout en 1905 en admettant que la lumière est **quantifiée** en photons, chacun cédant son énergie *en une seule fois*. C'est cette interprétation, et non la relativité, qui lui vaut le prix Nobel en 1921.

3 Travail d'extraction et bilan d'énergie

Définition

Le **travail d'extraction** W est l'énergie minimale nécessaire pour arracher un électron au métal. Il est caractéristique du métal et s'exprime couramment en électronvolts.

Méthode — Établir la relation d'Einstein

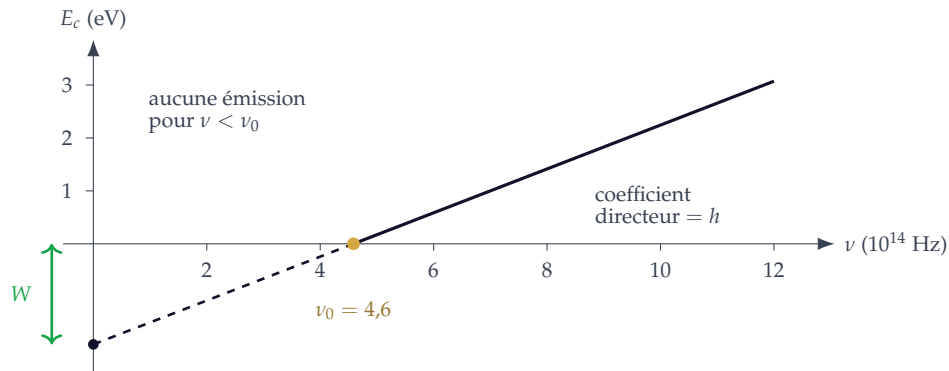
1. Un photon d'énergie $h\nu$ est absorbé par un électron du métal : il lui cède *toute* son énergie.
2. L'électron dépense d'abord W pour franchir la surface du métal. Le reste se retrouve sous forme d'énergie cinétique :

$$E_c = h\nu - W$$

3. L'éjection n'est possible que si $E_c > 0$, donc si $h\nu > W$. On définit ainsi la **fréquence seuil** :

$$\nu_0 = \frac{W}{h} \quad \text{et la longueur d'onde seuil} \quad \lambda_0 = \frac{hc}{W}$$

4. La relation se réécrit $E_c = h(\nu - \nu_0)$: le graphe de E_c en fonction de ν est une **droite** de coefficient directeur h .



Méthode — Exploiter un travail d'extraction

Le césium a pour travail d'extraction $W = 1,9 \text{ eV}$.

1. Fréquence seuil — on convertit d'abord W en joules :

$$W = 1,9 \times 1,60 \times 10^{-19} = 3,04 \times 10^{-19} \text{ J} \quad \nu_0 = \frac{W}{h} = \frac{3,04 \times 10^{-19}}{6,63 \times 10^{-34}} = 4,6 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

2. Longueur d'onde seuil :

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0} = \frac{3,00 \times 10^8}{4,59 \times 10^{14}} = 654 \text{ nm}$$

Le césium émet donc des électrons dès la lumière **rouge** : c'est ce qui en fait un excellent matériau pour les cellules photoélectriques.

3. Énergie cinétique maximale des électrons pour un éclairage violet, $\lambda = 400 \text{ nm}$:

$$E = \frac{hc}{\lambda} = 4,97 \times 10^{-19} \text{ J} = 3,10 \text{ eV}$$

$$E_c = E - W = 3,10 - 1,9 = 1,2 \text{ eV} = 1,9 \times 10^{-19} \text{ J}$$

4. Vitesse correspondante, avec $E_c = \frac{1}{2}m_e v^2$:

$$v = \sqrt{\frac{2E_c}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \times 1,92 \times 10^{-19}}{9,11 \times 10^{-31}}} = 6,5 \times 10^5 \text{ m/s}$$

! Attention à la **condition d'existence** : si $\lambda > \lambda_0$ (ou $\nu < \nu_0$), la relation $E_c = h\nu - W$ donnerait une valeur négative, ce qui n'a aucun sens. Il n'y a alors *aucune* émission — et augmenter l'intensité lumineuse n'y changera rien.

4 Applications de l'interaction photon-matière

Propriété

Une **cellule photoélectrique** comporte une cathode métallique et une anode dans une ampoule sous vide. Les photons arrachent des électrons à la cathode ; ceux-ci sont collectés par l'anode et créent un courant. L'intensité de ce courant est **proportionnelle au nombre de photons reçus**, donc à l'éclairement : la cellule mesure la lumière.

Applications à connaître : capteurs de lumière et détecteurs d'appareils photo ; **cellules photovoltaïques** ; **diodes électroluminescentes**, qui réalisent l'opération inverse en émettant un photon par électron ; **spectroscopies** UV-visible et infrarouge (chapitre 2), fondées sur l'absorption sélective de photons.

Définition

Le **rendement** d'une cellule photovoltaïque compare la puissance électrique fournie à la puissance lumineuse reçue :

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{électrique}}}{E \times S}$$

E étant l'éclairement en W/m^2 et S la surface du panneau.

Méthode — Rendement d'un panneau solaire

Un panneau de surface $S = 1,7 \text{ m}^2$ délivre $\mathcal{P} = 250 \text{ W}$ sous un éclairement $E = 800 \text{ W}/\text{m}^2$.

1. Puissance lumineuse reçue :

$$\mathcal{P}_{\text{reçue}} = E \times S = 800 \times 1,7 = 1360 \text{ W}$$

2. Rendement :

$$\eta = \frac{250}{1360} = 0,18 = 18 \%$$

3. Interprétation : 82 % de l'énergie lumineuse n'est pas convertie. Deux causes tiennent directement au modèle du photon — les photons d'énergie *inférieure* au seuil du matériau ne sont pas absorbés, et l'excédent d'énergie des photons trop énergétiques est dissipé en chaleur.

4. Ordre de grandeur : les panneaux commerciaux atteignent aujourd'hui 18 à 22 %. ✓

À retenir

- **Photon** : $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$, vitesse c , **masse nulle**. Un photon visible transporte 1 à 3 eV.
- **Effet photoélectrique** : éjection d'électrons d'un métal éclairé, avec une **fréquence seuil** inexplicable par le modèle ondulatoire.
- **Relation d'Einstein** : $E_c = h\nu - W$, avec $\nu_0 = \frac{W}{h}$ et $\lambda_0 = \frac{hc}{W}$.
- Le graphe $E_c = f(\nu)$ est une **droite** de coefficient directeur h , coupant l'axe des abscisses en ν_0 .
- L'**intensité** lumineuse fixe le **nombre** d'électrons ; la **fréquence** fixe leur **énergie**.
- **Rendement photovoltaïque** : $\eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{élec}}}{E S}$, de l'ordre de 20 %.
- **Piège** : $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$. Convertir W en joules *avant* de diviser par h .