

# Avant d'aborder le chapitre

## LES ACQUIS INDISPENSABLES

1<sup>re</sup> Enseignement de spécialité

- La lumière peut être décrite par deux modèles :
  - un modèle **ondulatoire** où la lumière est une onde électromagnétique ;
  - un modèle **particulaire** où la lumière est constituée de particules appelées photons.

Les deux modèles coexistent : on parle de **dualité onde-particule**.

- Une radiation de fréquence  $\nu$  ou de longueur d'onde dans le vide  $\lambda$  est un ensemble de photons transportant chacun l'énergie  $E$  telle que :

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

énergie du photon (en J) →  $E$  ← célérité de la lumière dans le vide  $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$   
 fréquence (en Hz) →  $\nu$  ← longueur d'onde (en m)  $\lambda$   
 la constante de Planck  $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

- L'énergie de l'atome est quantifiée : elle ne peut prendre que certaines valeurs. Un atome peut absorber un photon si l'énergie du photon correspond à l'écart entre deux niveaux.

Un atome dans un état excité (après une décharge électrique, un chauffage, une absorption de lumière etc.) peut restituer de l'énergie en émettant un photon.

# 1 Propriétés de l'effet photoélectrique

## ► Découverte de l'effet photoélectrique

L'effet photoélectrique est observé et présenté en 1839 par Antoine-César et Edmond Becquerel : ils détectent un courant électrique entre deux électrodes d'un même métal plongées dans une solution lorsque l'une des deux électrodes est éclairée par la lumière du Soleil. Cet effet a ensuite été étudié précisément en 1887 par Heinrich Hertz (1857-1894), physicien allemand, sans qu'il ne parvienne à interpréter toutes ses propriétés.

L'**effet photoélectrique** est l'émission d'électrons d'un matériau sous l'effet d'un rayonnement électromagnétique (FIG. 1).

## ► Propriétés

On constate expérimentalement que :

- l'émission d'électrons se produit à partir d'une fréquence limite appelée fréquence seuil qui dépend du matériau étudié mais pas de l'intensité du rayonnement ;
- le nombre d'électrons émis est proportionnel à l'intensité du rayonnement ;
- l'énergie cinétique de l'électron émis est proportionnelle à la fréquence du rayonnement.

L'**effet photoélectrique** se produit à partir d'une **fréquence seuil**, noté  $\nu_s$ , quelle que soit l'intensité du rayonnement. La fréquence seuil dépend du matériau étudié (FIG. 2).

**Remarque.** On peut associer à chaque fréquence seuil une longueur d'onde seuil dans le vide en utilisant la relation  $\lambda_s = c/\nu_s$ , avec  $c$  la célérité de la lumière dans le vide :  $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . L'effet photoélectrique se manifeste pour un rayonnement de longueur d'onde inférieure à la longueur d'onde seuil.

### EXEMPLE

La fréquence seuil du zinc vaut  $\nu_s = 8,11 \times 10^{14} \text{ Hz}$  et la longueur d'onde dans le vide associée est  $\lambda_s = 370 \text{ nm}$ . Un rayonnement de fréquence supérieure à  $8,11 \times 10^{14} \text{ Hz}$  et de longueur d'onde dans le vide inférieure à  $370 \text{ nm}$  provoque l'effet photoélectrique.

## ► Interprétation

Le modèle ondulatoire de la lumière ne permet pas d'expliquer l'existence d'une fréquence seuil et l'absence d'intensité lumineuse seuil.

Pour interpréter cela, Albert Einstein (1879-1955), physicien allemand, reprend en 1905 le modèle particulaire de la lumière abandonné à l'époque en faveur du modèle ondulatoire. Il l'associe à l'hypothèse de quantification de l'énergie émise par Max Planck (1858-1947) (FIG. 3).

Ainsi un rayonnement de fréquence  $\nu$  est un ensemble de photons, particules de masse nulle et de vitesse  $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  dans le vide, transportant chacun l'énergie  $E = h\nu$ . Si ce photon arrive sur un matériau de fréquence seuil  $\nu_s$  :

- si  $E_{\text{photon}} < h\nu_s$ , aucun électron n'est émis du matériau ;
- si  $E_{\text{photon}} \geq h\nu_s$ , des électrons sont émis même pour un seul photon.

L'effet photoélectrique ne peut être interprété qu'en utilisant le modèle particulaire de la lumière : la lumière est un ensemble de **photons** (FIG. 4) d'énergie  $E = h\nu$  avec  $h$  la constante de Planck  $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ .

Si l'énergie des photons est supérieure ou égale à  $h\nu_s$ , la lumière ou le rayonnement électromagnétique extrait des électrons du matériau.

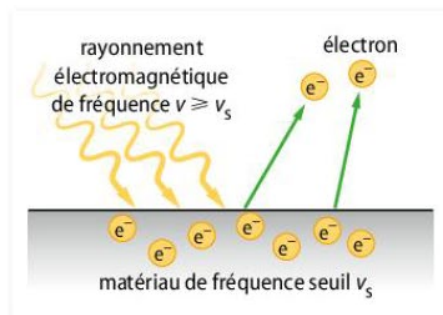


FIG. 1 Principe de l'effet photoélectrique.

Matériau	$\nu_s$	$\lambda_s$
Césium	$4,62 \times 10^{14} \text{ Hz}$	650 nm
Potassium	$5,56 \times 10^{14} \text{ Hz}$	540 nm
Baryum	$6,00 \times 10^{14} \text{ Hz}$	500 nm
Zinc	$8,11 \times 10^{14} \text{ Hz}$	370 nm
Cuivre	$1,03 \times 10^{14} \text{ Hz}$	290 nm

FIG. 2 Fréquences et longueurs d'onde seuil de différents matériaux.



FIG. 3 Albert Einstein reçoit la médaille Max Planck de ses mains le 28 juin 1929.

Nom : photon
Fonction : particule de lumière
Masse : $m = 0$ au repos
Charge : $q = 0 \text{ C}$
Énergie : $E = h\nu$
Vitesse : $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dans le vide

FIG. 4 Caractéristiques du photon

## 2 Aspect énergétique

### ► Travail d'extraction

L'effet photoélectrique se produit pour une fréquence seuil qui dépend du matériau. D'un point de vue énergétique, cela se traduit par l'existence d'un travail d'extraction de l'électron. Il est nécessaire de fournir une énergie minimale à un matériau pour en extraire un électron. Plus le travail d'extraction est important et plus l'électron est lié au matériau.

Le **travail d'extraction** est l'énergie minimale à fournir à un matériau pour en extraire un électron. Son symbole est  $W$  et son unité est le joule de symbole J.

On a la relation :

$$\text{travail d'extraction (en J)} \rightarrow W = h\nu_s$$

$\swarrow$  fréquence (en Hz)  
 $\nwarrow$  constante de Planck  
 $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

Le travail d'extraction dépend du matériau étudié.

**Remarque.** Les valeurs du travail d'extraction étant faibles, on utilise couramment comme unité l'électron-volt de symbole eV avec la conversion  $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$ .

#### EXEMPLE

La fréquence seuil du zinc vaut  $\nu_s = 8,11 \times 10^{14} \text{ Hz}$ . Le travail d'extraction pour le zinc se calcule  $W = h \times \nu_s = 6,63 \times 10^{-34} \times 8,11 \times 10^{14} = 5,38 \times 10^{-19} \text{ J} = 5,38 \times 10^{-19} / 1,602 \times 10^{-19} = 3,36 \text{ eV}$ . Si un photon possède une énergie supérieure ou égale à  $3,36 \text{ eV}$ , il peut extraire un électron du zinc.

### ► Énergie cinétique de l'électron

Soit un rayonnement de fréquence  $\nu$  qui éclaire un matériau de fréquence seuil  $\nu_s$  tel que  $\nu > \nu_s$ . L'énergie du photon  $E_{\text{photon}} = h\nu$  est supérieure au travail d'extraction  $W = h\nu_s$ . Un électron est donc extrait du matériau et possède une énergie cinétique  $E_c$  correspondant à l'énergie excédentaire. En effet la conservation de l'énergie implique :

$E_{\text{photon}} = W + E_c$  et  $E_c = E_{\text{photon}} - W = h\nu - h\nu_s = h(\nu - \nu_s)$ . L'énergie cinétique de l'électron augmente donc linéairement avec la fréquence du rayonnement.

Si un photon de fréquence  $\nu$  extrait un électron d'un matériau de fréquence seuil  $\nu_s$  telle que  $\nu > \nu_s$ , l'électron possède une **énergie cinétique**  $E_c$  telle que :

$$\text{énergie cinétique de l'électron (en J)} \rightarrow E_c = E_{\text{photon}} - W = h\nu - h\nu_s = h(\nu - \nu_s)$$

$\swarrow$  énergie du photon (en J)       $\swarrow$  travail d'extraction (en J)       $\swarrow$  fréquence (en Hz)  
 $\nwarrow$  constante de Planck  $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$        $\nwarrow$  fréquence seuil (en Hz)

**Remarque.** On peut également calculer la vitesse de l'électron avec la relation

$$E_c = \frac{1}{2} m_e v^2 \text{ donc } v = \sqrt{\frac{2E_c}{m_e}} \text{ avec } m_e \text{ la masse de l'électron telle que } m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg.}$$

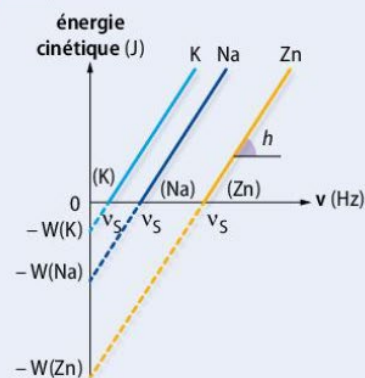
#### EXEMPLE

Un rayonnement de fréquence  $\nu = 10,0 \times 10^{14} \text{ Hz}$  éclaire le zinc de travail d'extraction  $W = 5,38 \times 10^{-19} \text{ J}$ , l'énergie cinétique de l'électron extrait se calcule :  
 $E_c = E_{\text{photon}} - W = h\nu - W = 10,0 \times 10^{14} \times 6,63 \times 10^{-34} - 5,38 \times 10^{-19} = 1,25 \times 10^{-19} \text{ J}$ .

La vitesse de l'électron se calcule :  $v = \sqrt{\frac{2E_c}{m_e}} = 5,24 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### UN PONT VERS LES MATHS

Le tracé de l'**énergie cinétique** de l'électron en fonction de la fréquence du rayonnement est une droite de coefficient directeur  $h$ , qui coupe l'axe des abscisses en  $\nu_s$  et a pour ordonnée à l'origine  $-W$ .



### 3 Applications de l'interaction photon-matière

#### ► Cellule photoélectrique

Une cellule photoélectrique est constituée de deux électrodes : la cathode et l'anode enfermées dans un tube vide ou rempli d'un gaz inerte (FIG. 5). Lorsque la cellule est reliée à un circuit électrique comprenant une source de tension et que la cathode est éclairée par un rayonnement de fréquence supérieure à sa fréquence seuil, elle émet des électrons qui sont collectés à l'anode. Le courant électrique obtenu augmente avec le nombre de photon reçus donc l'intensité de la source de rayonnement.

Les cellules photoélectriques permettent ainsi de convertir un signal lumineux en signal électrique et sont utilisées :

- pour mesurer l'intensité lumineuse dans les luxmètres, les spectrophotomètres et les spectromètres (UV-Vi, IR) ;
- dans des dispositifs contrôlés par la lumière : interrupteurs crépusculaires, contrôle de présence d'un objet par un faisceau lumineux etc.

Une **cellule photoélectrique** est un dispositif qui engendre un courant électrique sous l'effet de la lumière. Ces cellules sont utilisées pour mesurer l'intensité lumineuse d'une source et comme capteur de lumière.

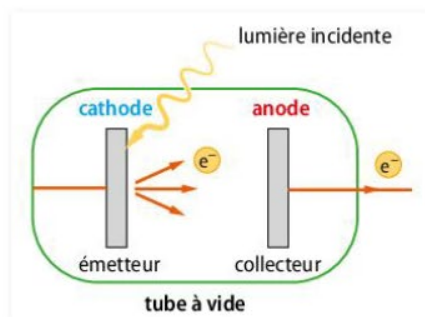


FIG. 5 Principe d'une cellule photo-électrique

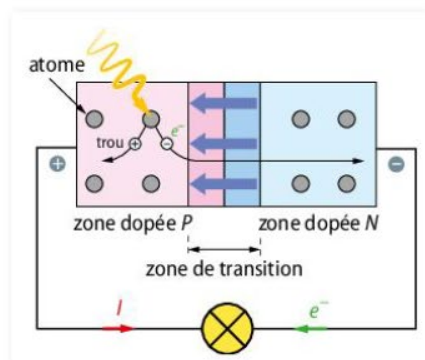


FIG. 6 Principe d'une cellule photovoltaïque

#### ► Utilisation des semi-conducteurs

L'utilisation de matériaux semi-conducteurs en jonction PN (FIG. 6) et l'exploitation de l'effet photoélectrique a permis la mise au point de nombreux dispositifs comme les cellules photovoltaïques et des diodes électroluminescentes (DEL). Dans les deux cas, les niveaux d'énergie des matériaux sont représentés par des bandes d'énergie (FIG. 7).

Si l'énergie d'un photon est supérieure à une énergie appelée « énergie du gap » un électron est extrait ce qui engendre un courant électrique. C'est ainsi que les cellules photovoltaïques convertissent l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Le rendement d'une cellule photovoltaïque mesure l'efficacité de la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique. Il dépend de la technologie et se situe actuellement entre 5 et 18 %.

Une **cellule photovoltaïque** est un dispositif qui convertit l'énergie lumineuse en énergie électrique et est utilisée pour la production d'électricité. Le rendement  $\eta$  d'une cellule photovoltaïque se calcule :

$$\eta = \frac{E_{\text{utile}}}{E_{\text{fournie}}} = \frac{E_{\text{électrique}}}{E_{\text{lumineuse}}} \times 100$$

où  $\eta = \frac{P_{\text{électrique}}}{P_{\text{lumineuse}}} \times 100$   $\eta$  sans unité et  $E$  l'énergie en  $J$ ,  
 $P$  la puissance en  $W$ .

Pour déterminer expérimentalement le rendement, on éclaire la cellule photovoltaïque par une source de lumière de puissance  $P_{\text{lumineuse}}$  puis on mesure la tension  $U$  aux bornes de la cellule pour différentes valeurs de l'intensité  $I$ . Le tracé de  $I = f(U)$  et  $P = f(U)$  permet de déterminer la puissance électrique maximale  $P_{\text{électrique}}$  (FIG. 8).

Dans le cas d'une diode électroluminescente (notée DEL et de symbole  $\rightarrow \text{---} \leftarrow$ ), on exploite également une jonction PN que l'on relie à une source de tension. Lorsque la DEL est polarisée en sens direct, un électron se recombine à un trou (lacune électronique) : cela libère de l'énergie sous forme d'émission de photon (FIG. 7).

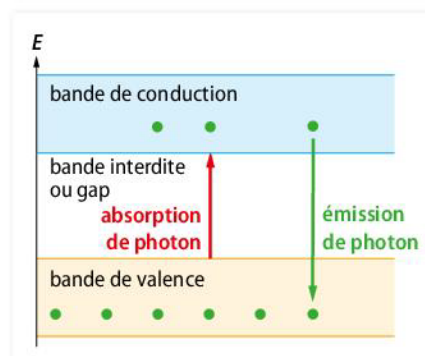


FIG. 7 Bandes d'énergie dans les matériaux utilisés dans les cellules photovoltaïques et les DEL. L'absorption de photon est exploitée dans les cellules photovoltaïques, l'émission dans les diodes électroluminescentes.

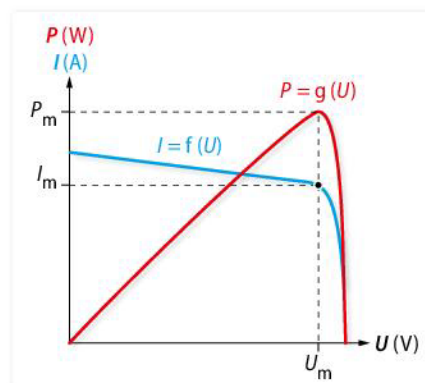
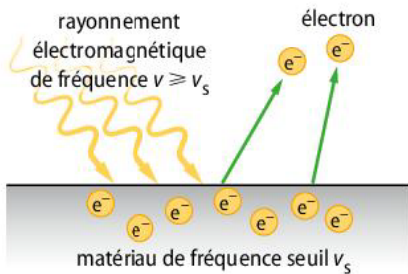


FIG. 8 Détermination de la puissance électrique maximale d'une cellule photovoltaïque.

### 1 Propriétés de l'effet photoélectrique

#### Principe de l'effet photoélectrique



L'effet photoélectrique dépend de la **fréquence seuils  $\nu_s$** .  
L'énergie cinétique de l'électron dépend de la fréquence.

Interprétation en 1905 par Einstein qui utilise la notion de photon

- Nom : photon
- Fonction : particule de lumière
- Masse :  $m = 0$  au repos
- Charge :  $q = 0$  C
- Énergie :  $E = h\nu$
- Vitesse :  $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  dans le vide

### 2 Aspect énergétique

#### Travail l'extraction d'un électron

travail d'extraction (J)  $\rightarrow W = h\nu_s$  ← fréquence (Hz)

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

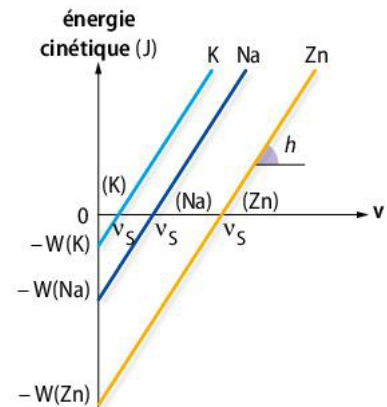
#### Conservation de l'énergie

énergie du photon (J) → travail d'extraction (J) → fréquence (Hz)

énergie cinétique de l'électron (J)  $\rightarrow E_c = E_{\text{photon}} - W = h\nu - h\nu_s = h(\nu - \nu_s)$

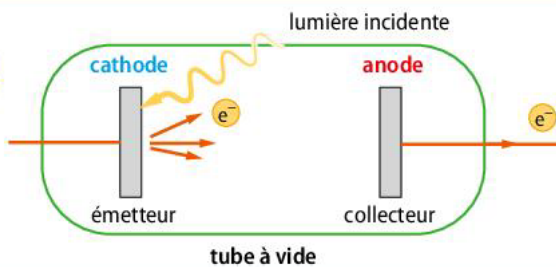
constante de Planck  $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ (J} \cdot \text{s)}$  ← fréquence seuil (Hz)

#### Tracé de l'énergie cinétique de l'électron en fonction de la fréquence

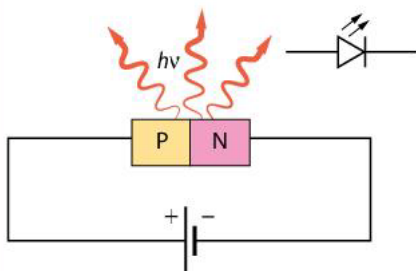


### 3 Applications de l'interaction photon-matière

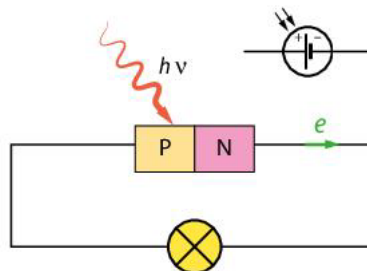
#### Cellule photoélectrique



#### DEL (diode électroluminescente)



#### Cellule photovoltaïque



#### Rendement d'une cellule photovoltaïque

$$\eta = \frac{E_{\text{utile}}}{E_{\text{fournie}}} = \frac{E_{\text{électrique}}}{E_{\text{lumineuse}}} \times 100$$

$$\eta = \frac{P_{\text{électrique}}}{P_{\text{lumineuse}}} \times 100$$

#### Mesure de $P_{\text{électrique}}$

