

Révisions et échauffements pages 508 et 509 -

## 1. L'effet photoélectrique : une preuve de la nature corpusculaire

### Activités 1 & 2 pages 510 & 511

L'effet photoélectrique est l'émission d'électrons par un matériau (généralement un métal) lorsqu'il est éclairé par un rayonnement électromagnétique.

**Observation** : Découvert par Hertz et Becquerel à la fin du XIXe siècle.

**Problème** : Le modèle ondulatoire classique ne peut pas expliquer pourquoi l'émission d'électrons dépend de la **fréquence** de la lumière et non de son intensité.

**Interprétation** (Einstein, 1905) : La lumière n'est pas une onde continue, mais un flux de particules d'énergie, les **photons**.

Les travaux d'**Albert Einstein** ont apporté une interprétation surprenante : l'effet photoélectrique ne peut être interprété qu'en utilisant le modèle particulaire de la lumière. 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.

La lumière est un ensemble de **photons** d'énergie  $E = h\nu$ . Si l'énergie des photons est supérieure ou égale à  $h\nu_S$ , la lumière (le rayonnement électromagnétique) extrait des électrons du matériau.

Le travail d'extraction  $W_{ext}$  est le travail qu'il faut fournir à un électron pour l'arracher du métal. Il est exprimé en joules (J).

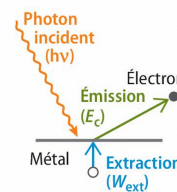
Le travail d'extraction est lié à la fréquence de seuil, on peut faire un bilan d'énergie de 'extraction photoélectrique :

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 :

$$E_C = E_{photon} - W = h\nu - h\nu_S = h(\nu - \nu_S)$$

#### Effet photoélectrique

Interaction lumière-métal



#### Bilan énergétique

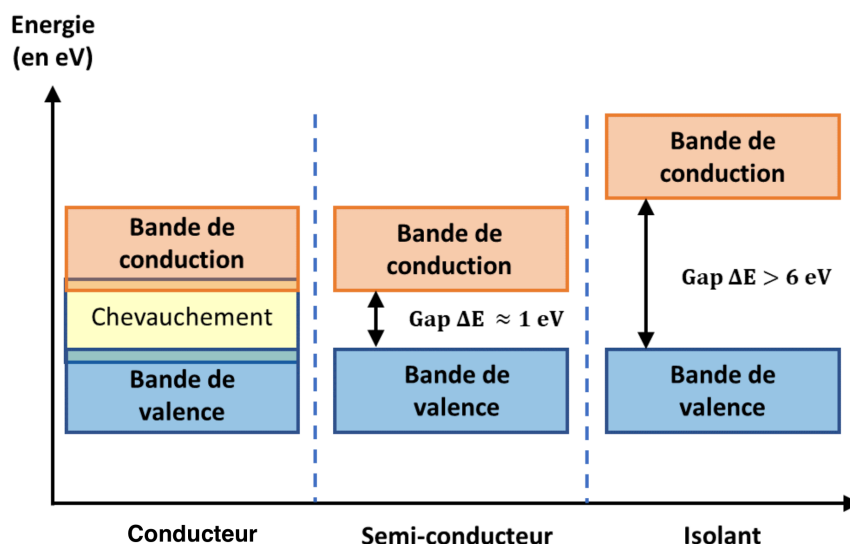
- Travail d'extraction :  $W_{ext} = h\nu_S$
  - Énergie cinétique de l'électron extrait :  $E_C = h(\nu - \nu_S)$
- $\nu$  : fréquence du rayonnement incident en hertz (Hz)  
 $\nu_S$  : fréquence seuil en hertz (Hz)

Exercices 29 et 31 page 524 ; 36 page 525 ; 34 et 35 page 524

## 2. Applications de l'interaction lumière-matière

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.

**Les cellules photovoltaïques** fonctionnent grâce à l'effet photoélectrique.



Dans un solide, l'énergie des électrons est quantifiée. Les niveaux d'énergie autorisés pour les électrons se regroupent par paquet, appelés « bandes », et sont séparés par des bandes interdites.

Lorsque le matériau est à son niveau d'énergie minimale, les électrons sont dans la bande de valence. Le courant ne peut circuler que si un ou plusieurs électrons sont mobiles et peuvent se déplacer dans le matériau. Ils doivent pour cela se trouver dans la bande de conduction.

Si la bande de valence et la bande de conduction se chevauchent, le matériau est conducteur.

Si un écart  $\Delta E$  existe entre ces deux bandes, celui-ci est appelé gap. Pour les isolants le gap est élevé et les électrons ne peuvent pas passer d'une bande à l'autre. Pour un matériau semi-conducteur le gap est faible  $\Delta E \approx 1 \text{ eV}$ . L'énergie  $h\nu$  apportée par un photon, si elle est supérieure au gap, peut permettre à un électron de rejoindre la bande de conduction. L'énergie excédentaire est communiquée aux électrons et un courant électrique s'établit dans le matériau.

La performance d'une **cellule photovoltaïque** est caractérisée par son rendement en comparant la puissance électrique produite avec la puissance lumineuse reçue.

$$\eta = \frac{P_{el}}{P_{lum}} = \frac{P_{el}}{\epsilon S}$$

$\epsilon$  est l'éclairement exprimé en  $W \cdot m^{-2}$

Exercices : 25 page 521 ; 34 et 35 page 524 ; 41 page 526

### La diode électroluminescente (DEL)

Dans une DEL l'énergie électrique est convertie en énergie lumineuse, c'est le processus inverse de celui qui se produit dans la cellule photovoltaïque. Un électron de la bande de la bande de conduction passe à la bande de valence. Cette diminution de niveau d'énergie est accompagnée par l'émission d'un photon.

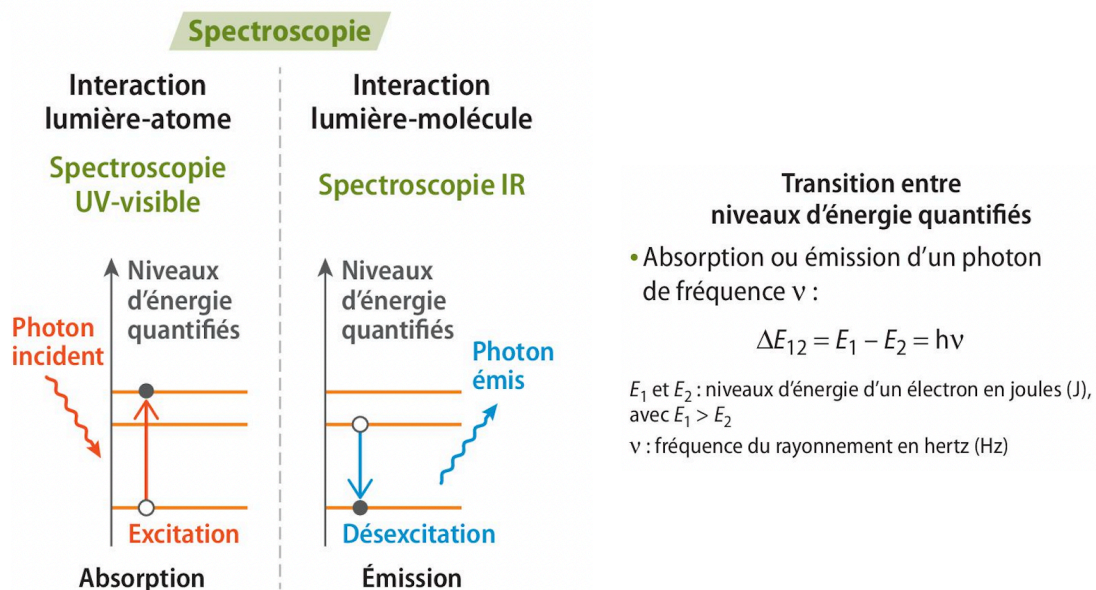
Exercice 40 page 525

### La spectroscopie

La spectroscopie est également une application de l'interaction lumière-matière. L'énergie apportée par un photon permet à un atome ou une molécule d'atteindre un niveau d'énergie plus élevé, on parle alors d'état excité.

Ces niveaux d'énergie sont quantifiés, les transitions énergétiques  $\Delta E$  ne peuvent prendre que certaines valeurs bien précises et caractéristiques des éléments ou des liaisons chimiques.

C'est donc une méthode essentielle d'analyse en chimie.



Voici une version révisée et structurée de votre cours, alignée sur le Bulletin Officiel (BO) de Terminale (thème « Ondes et signaux », partie « Former des images, décrire la lumière par un flux de photons »).

J'ai intégré les notions manquantes du BO (comme la relation de Planck  $E=h\nu$ , la notion de travail d'extraction  $W_{\text{ext}}$ , et les applications actuelles) et supprimé les références aux pages de manuel obsolètes. La mise en page est conçue pour être copiée-collée directement dans Word, utilisant uniquement le gras et les tailles de police pour la hiérarchie.

---

# Interaction lumière-matière : Effet photoélectrique et applications

\*\*Thème : Ondes et signaux | Programme Terminale Générale (Spécialité Physique-Chimie)\*\*

## 1. L'effet photoélectrique : une preuve de la nature corpusculaire

### 1.1. Phénomène et historique

L'effet photoélectrique est l'émission d'électrons par un matériau (généralement un métal) lorsqu'il est éclairé par un rayonnement électromagnétique.

\* **Observation :** Découvert par Hertz et Becquerel à la fin du XIXe siècle.

\* **Problème :** Le modèle ondulatoire classique ne peut pas expliquer pourquoi l'émission d'électrons dépend de la *fréquence* de la lumière et non de son intensité.

\* **Interprétation (Einstein, 1905) :** La lumière n'est pas une onde continue, mais un flux de particules d'énergie, les **photons**.

### 1.2. Modèle quantique de la lumière

La lumière est constituée de photons. L'énergie  $E$  d'un photon est liée à la fréquence  $\nu$  de la radiation par la relation de Planck-Einstein :

$$E = h \times \nu$$

\*  $E$  : Énergie du photon (en Joules, J)

\*  $h$  : Constante de Planck ( $h \approx 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ )

\*  $\nu$  ( $\nu$ ) : Fréquence de la radiation (en Hertz, Hz)

### 1.3. Condition d'émission et bilan d'énergie

Pour qu'un électron soit éjecté d'un métal, il doit recevoir suffisamment d'énergie pour vaincre les forces de cohésion du matériau.

\* **Travail d'extraction ( $W_{\text{ext}}$ ) :** Énergie minimale qu'il faut fournir à un électron pour l'arracher du métal. Elle est propre au matériau (exprimée en Joules ou en électronvolts eV).

\* **Fréquence seuil ( $\nu_S$ ) :** Fréquence minimale du rayonnement pour que l'effet se produise. Elle est liée au travail d'extraction par :

$$W_{\text{ext}} = h \times \nu_S$$

**Condition d'émission :**

L'effet photoélectrique ne se produit que si la fréquence de la lumière incidente est supérieure à la fréquence seuil :

$$\nu > \nu_S \quad \text{(ou)} \quad E > W_{\text{ext}}$$

Si cette condition est remplie, l'énergie excédentaire du photon est convertie en énergie cinétique de l'électron émis (électron primaire).

**Équation de conservation de l'énergie (Bilan) :**

$$E_{\text{cinétique}} = h\nu - W_{\text{ext}}$$

Ou sous la forme :

$$E_{\text{cinétique}} = h(\nu - \nu_S)$$

- \* Si  $h\nu = W_{\text{ext}}$ , l'électron est émis avec une vitesse nulle (cas limite).
- \* Si  $h\nu < W_{\text{ext}}$ , aucun électron n'est émis, quelle que soit l'intensité de la lumière.

---

## ## 2. Applications de l'interaction lumière-matière

### ### 2.1. Cellules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui convertit directement l'énergie lumineuse en énergie électrique grâce à l'effet photoélectrique.

\* **Principe :** Dans un semi-conducteur, l'énergie des électrons est organisée en **bandes** (bande de valence et bande de conduction) séparées par une **bande interdite** (gap,  $\Delta E$ ).

\* **Mécanisme :**

1. Un photon d'énergie  $h\nu$  supérieure au gap  $\Delta E$  est absorbé.
2. Un électron passe de la bande de valence à la bande de conduction, laissant un "trou".
3. Un champ électrique interne sépare les charges, créant un courant électrique.

\* **Rendement ( $\eta$ ) :** Il caractérise la performance de la cellule. Il est défini comme le rapport entre la puissance électrique produite ( $P_{\text{él}}$ ) et la puissance lumineuse reçue ( $P_{\text{lum}}$ ).

$$\eta = \frac{P_{\text{él}}}{P_{\text{lum}}} = \frac{P_{\text{él}}}{\varepsilon \cdot S}$$

\*  $\varepsilon$  : Éclairement énergétique (en  $W \cdot m^{-2}$ )

\*  $S$  : Surface de la cellule (en  $m^2$ )

### ### 2.2. Diode électroluminescente (DEL ou LED)

La DEL réalise le processus inverse de la cellule photovoltaïque : conversion de l'énergie électrique en lumière.

\* **Principe :** Lorsqu'un courant électrique traverse la DEL, des électrons de la bande de conduction tombent dans la bande de valence.

\* **Émission :** La diminution de niveau d'énergie est compensée par l'émission d'un photon d'énergie  $E = h\nu$ .

\* **Couleur :** La couleur de la lumière émise dépend de la largeur de la bande interdite du matériau semi-conducteur utilisé (gap  $\Delta E$ ).

### ### 2.3. Spectroscopie

La spectroscopie exploite le fait que les niveaux d'énergie des atomes et molécules sont **quantifiés**.

\* **Absorption :** Un photon est absorbé si son énergie correspond exactement à la différence entre deux niveaux d'énergie autorisés ( $\Delta E = h\nu$ ). L'atome passe dans un état excité.

\* **Émission :** En revenant à l'état fondamental, l'atome émet un photon de fréquence caractéristique.

\* **Utilisation :** Chaque élément chimique possède un "spectre" unique (une série de raies d'émission ou d'absorption), ce qui permet de l'identifier et de déterminer la composition de systèmes complexes (chimie, astronomie, analyse médicale).

---

## ## 3. Capacités exigibles et compétences associées

Pour l'épreuve de spécialité, l'élève doit être capable de :

1. **Décrire l'effet photoélectrique** et ses caractéristiques expérimentales (seuil de fréquence, indépendance de l'intensité).
2. **Interpréter le phénomène** qualitativement à l'aide du modèle particulière de la lumière.

3. **Établir et exploiter le bilan d'énergie** :
  - \* Écrire la relation  $E_{\text{cin}} = h\nu - W_{\text{ext}}$ .
  - \* Utiliser la relation  $E = h\nu$ .
4. **Expliquer le fonctionnement** d'une cellule photovoltaïque et d'une DEL.
5. **Calculer le rendement** d'une cellule photovoltaïque à partir de mesures de puissance.
6. **Identifier des applications** actuelles mettant en jeu l'interaction photon-matière (capteurs, cellules solaires, DEL, spectroscopies).

---

# 1 À la découverte de l'effet photoélectrique

Histoire  
des sciences

En 1921, Albert Einstein reçoit le prix Nobel de physique pour son interprétation de l'effet photoélectrique. La contribution à ces travaux de son épouse Mileva Marić est vraisemblable : elle avait suivi les cours du professeur Lenard sur les rayons cathodiques et la première version de l'article était signée de leurs deux noms.



Mileva Marić  
et Albert Einstein.

**Objectif** Comprendre et interpréter l'effet photoélectrique.

## 1 Expérience de Hertz

Un électroscope est formé d'une plaque et de deux tiges, portant une charge électrique  $Q$ .

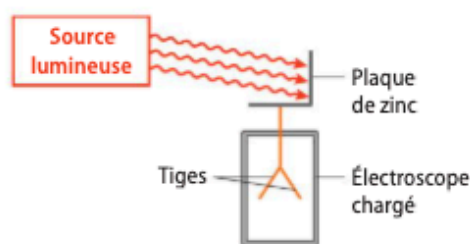
Si  $Q$  est non nulle, les tiges portent une charge de même signe, donc elles se repoussent en faisant entre elles un angle d'autant plus grand que  $|Q|$  est grande.

En 1887, le physicien allemand Heinrich Rudolph Hertz (1857-1894) a l'idée d'éclairer avec un faisceau lumineux une plaque de zinc portant une charge initiale  $Q_0$ , posée sur le plateau d'un électroscope.

**Observations expérimentales**

(OE1) Si  $Q_0 < 0$ , l'angle entre les tiges de l'électroscope diminue et elles finissent par se toucher quand on éclaire la plaque.

(OE2) Si  $Q_0 > 0$ , l'angle entre les tiges augmente quand on éclaire la plaque.



## 2 Observations expérimentales complémentaires

Après la découverte et la compréhension du mécanisme de l'effet photoélectrique, des scientifiques ont étudié l'influence de la fréquence  $\nu$  de la lumière utilisée, et celle de son éclairement  $\epsilon$ , exprimé en joules par seconde et par mètre carré ( $\text{J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ).

(OE3) Il n'y a émission d'électrons que si  $\nu$  est suffisamment élevée et dépasse une valeur limite  $\nu_s$ , appelée fréquence seuil.

(OE4) Lorsque  $\nu < \nu_s$ , aucun électron n'est émis, et cela quelle que soit la valeur de l'éclairement  $\epsilon$ .

(OE5) Lorsque  $\nu > \nu_s$ , l'énergie cinétique des électrons émis croît lorsque  $\nu$  croît et ne dépend pas de l'éclairement  $\epsilon$ .

## 3 Énergie lumineuse

• **Modèle ondulatoire** : l'énergie lumineuse transférée est proportionnelle à l'éclairement  $\epsilon$  et à la durée de l'éclairement  $\Delta t$  :  $E = K\epsilon\Delta t$

• **Modèle particulaire** : la lumière est formée de photons portant une quantité indivisible d'énergie :  $E = h\nu$  où  $\nu$  est la fréquence de la lumière utilisée et  $h$ , la constante de Planck.

## Questions

1 On fait l'hypothèse que la lumière qui frappe la plaque de zinc dans l'expérience de Hertz (doc. 1) provoque l'émission de particules chargées extraites de la plaque. Justifier, à partir des observations (OE1) et (OE2), que ces particules sont des électrons.

On admet qu'un électron ne peut être arraché d'un atome que si celui-ci reçoit une énergie minimale appelée **travail d'extraction**  $W_{\text{ext}}$ .

2 Pourquoi l'observation (OE4) (doc. 2) contredit-elle le modèle ondulatoire de la lumière (doc. 3) ?

On se place désormais dans le modèle corpusculaire (doc. 3) : un photon frappant un atome du métal lui transfère son énergie.

3 Donner l'expression de la fréquence  $\nu_s$  en fonction de  $W_{\text{ext}}$  et de  $h$ .

4 L'énergie du photon absorbé se décompose ainsi :  $h\nu = W_{\text{ext}} + E_c$  où  $E_c$  est l'énergie cinétique de l'électron émis. Expliquer l'observation (OE5).

## Bilan

• Expliquer l'effet photoélectrique, c'est-à-dire l'arrachement d'électrons par action de la lumière, à l'aide du modèle particulaire.

• En quelles unités les grandeurs  $\nu$ ,  $E_c$ ,  $W_{\text{ext}}$  et la constante de Planck  $h$  sont-elles exprimées ?

↳ Cours 1 et 2 p. 514

## 2 Modèle particulaire et travail d'extraction

L'effet photoélectrique permet l'émission d'électrons sous l'action d'un rayonnement électromagnétique. L'énergie cinétique de ces électrons est une fonction croissante de la fréquence de ce rayonnement.

**Objectif** Établir la relation entre l'énergie cinétique des électrons et la fréquence du rayonnement incident.

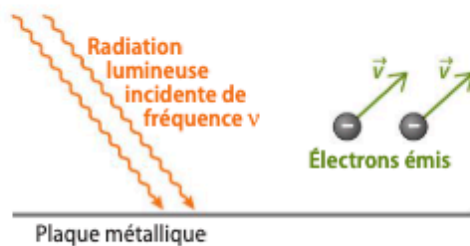


L'ionosphère est une couche de l'atmosphère, créée par l'ionisation des atomes frappés par les rayons solaires.

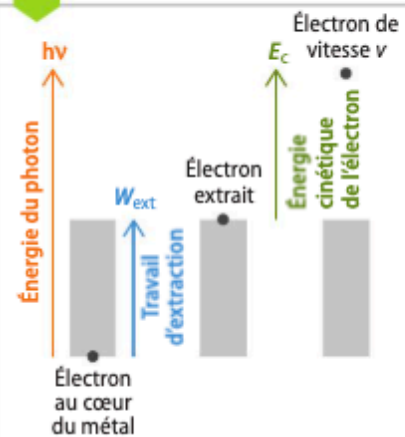
### 1 Le travail d'extraction

Pour arracher un électron d'une plaque métallique, il faut lui fournir une énergie minimale  $W_{\text{ext}}$  appelée travail d'extraction. Cette énergie est apportée par un photon lorsque le métal est éclairé par une radiation lumineuse.

Si le rayonnement électromagnétique apporte une énergie supérieure au travail d'extraction, le surplus est cédé à l'électron émis sous forme d'énergie cinétique :  $E_c = \frac{1}{2} m_e v^2$



### 2 Diagramme énergétique



### 3 Étude d'une plaque de sodium

On éclaire une plaque de sodium avec plusieurs radiations de longueur d'onde  $\lambda$  et on mesure la vitesse  $v$  des électrons émis. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant.

$\lambda$ (en nm)	400	425	450	475	500	525	550	575
$v$ ( $\times 10^5$ m·s <sup>-1</sup> )	5,71	5,12	4,53	3,92	3,29	2,57	1,66	mesure impossible

#### Données

- Constante de Planck :  $h = 6,63 \times 10^{-34}$  J·s
- Masse d'un électron :  $m_e = 9,11 \times 10^{-31}$  kg
- Électron-volt :  $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19}$  J
- Vitesse (célérité) de la lumière dans le vide :  $c = 3,00 \times 10^8$  m·s<sup>-1</sup>

### Questions

- 1 Quelle inégalité l'énergie du photon doit-elle vérifier pour arracher un électron (doc. 1) ? Expliquer l'indication « mesure impossible » dans le tableau (doc. 3).
- 2 L'énergie du photon absorbé vaut  $h\nu$ . L'électron est initialement immobile dans le métal. Il faut lui fournir le travail  $W_{\text{ext}}$  pour l'extraire du métal. On note  $E_c$  son énergie cinétique finale. En utilisant le diagramme énergétique du (doc. 2), établir la relation  $h\nu = W_{\text{ext}} + E_c$ .
- 3 Recopier le tableau de valeurs et calculer, dans chaque cas, la valeur de l'énergie du photon  $E = h\nu$  et celle de l'énergie cinétique de l'électron.
- 4 Placer les points sur un graphique représentant  $E$  en fonction de  $E_c$ , tracer la droite-modèle et calculer le coefficient directeur de la droite. [Fiche 8 p. 605](#)

[Représentations graphiques p. 14](#)

En déduire que la loi de la question 2 est vérifiée et déterminer la valeur de  $W_{\text{ext}}$ .

- 5 Calculer la valeur de la fréquence seuil  $\nu_s$  à partir de laquelle l'effet photoélectrique est observable.

### Bilan

- Exprimer la vitesse de l'électron en fonction de la fréquence  $\nu$  du rayonnement.
- Vérifier que cette expression n'est valable que si  $\nu > \nu_s$ .

[Cours 2 p. 514](#)