

La lumière : flux de photons

Une lampe rouge très puissante ne peut pas arracher un seul électron à une plaque de zinc, alors qu'une faible lampe UV y parvient instantanément. Comment la lumière, qui est une onde, peut-elle se comporter comme une pluie de « grains » d'énergie ?

Ce que tu vas savoir faire

- Décrire la lumière par un flux de photons : calculer l'énergie $E = h\nu = hc/\lambda$ d'un photon (en J et en eV) et un nombre de photons par seconde
- Décrire l'effet photoélectrique, ses caractéristiques et son importance historique
- Interpréter l'effet photoélectrique avec le modèle du photon et établir $E_{c,\max} = h\nu - W$
- Identifier des situations d'absorption ou d'émission de photons et exploiter un diagramme de niveaux d'énergie
- Citer des applications de l'interaction photon-matière (capteurs, cellules photovoltaïques, DEL, spectroscopies)
- Déterminer le rendement d'une cellule photovoltaïque

À revoir avant de commencer

- Ondes électromagnétiques : longueur d'onde, fréquence, $\lambda = c/\nu$, domaines UV, visible, IR (1re)
- Quantification des niveaux d'énergie d'un atome, spectres de raies (1re)
- Énergie cinétique $E_c = \frac{1}{2}mv^2$, puissance $P = E/\Delta t$ (1re)
- Puissance électrique $P = U \cdot I$ et rendement d'un convertisseur (1re)

1 Le cours

1. Onde ou particule ? La dualité onde-particule

Diffraction, interférences (fiche 14) : la lumière se comporte comme une **onde**. Pourtant, certaines expériences sont inexplicables avec ce modèle : la lumière y échange de l'énergie avec la matière par **paquets indivisibles**, comme si elle était faite de grains. Ces grains sont les **photons**.

Définition – Le photon

La lumière (et plus généralement toute onde électromagnétique) peut être décrite comme un **flux de photons**, particules :

- de **masse nulle** ;
- se déplaçant dans le vide à la vitesse $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;
- transportant chacune un **quantum** d'énergie qui ne dépend que de la fréquence ν de l'onde associée.

Relation de Planck-Einstein – Énergie d'un photon

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

E : énergie du photon en joules (J) ; $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$: constante de Planck ; ν : fréquence en hertz (Hz) ; λ : longueur d'onde dans le vide en mètres (m) ; c en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

L'électronvolt : à l'échelle atomique, on utilise $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$ (énergie acquise par un électron accéléré sous 1 V). Pour convertir des joules en eV, on **divise** par $1,60 \times 10^{-19}$.

La dualité onde-particule

Ni « onde » ni « particule » ne suffit seul : la lumière présente les deux aspects, c'est la **dualité onde-particule**. Le modèle ondulatoire décrit sa **propagation** (diffraction, interférences) ; le modèle particulaire décrit ses **échanges d'énergie** avec la matière (absorption, émission, effet photoélectrique). Les deux sont reliés par $E = h\nu$: plus la fréquence est grande (plus λ est petite), plus les photons sont énergétiques. Un photon UV transporte plus d'énergie qu'un photon rouge, lui-même plus énergétique qu'un photon infrarouge.

Relation – Flux de photons et puissance lumineuse

Une source monochromatique de puissance lumineuse P émet N photons par seconde, chacun d'énergie $E = h\nu$:

$$P = N h \nu \quad \Longleftrightarrow \quad N = \frac{P}{h \nu} = \frac{P \lambda}{h c}$$

P en watts (W) ; N en photons par seconde (s^{-1}) ; $h\nu$ en J. Une lumière plus **intense** contient plus de photons, mais **chaque** photon garde la même énergie.

Exemple résolu – Les photons d'un laser vert

Un pointeur laser vert émet une lumière de longueur d'onde $\lambda = 532 \text{ nm}$ avec une puissance $P = 5,0 \text{ mW}$. Calculer l'énergie d'un photon en J et en eV, puis le nombre de photons émis par seconde.

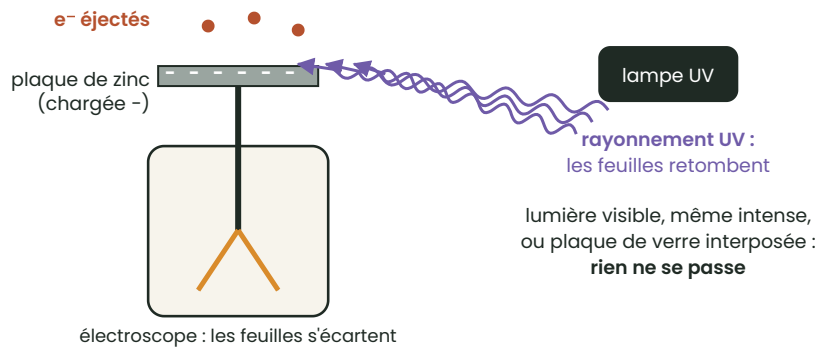
Solution

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{532 \times 10^{-9}} = 3,74 \times 10^{-19} \text{ J, soit } \frac{3,74 \times 10^{-19}}{1,60 \times 10^{-19}} = 2,34 \text{ eV.}$$

$$N = \frac{P}{E} = \frac{5,0 \times 10^{-3}}{3,74 \times 10^{-19}} = 1,3 \times 10^{16} \text{ photons par seconde : un flux gigantesque, d'où l'impression d'une lumière « continue ».}$$

2. L'effet photoélectrique

En 1887, Heinrich Hertz remarque qu'une étincelle jaillit plus facilement entre deux électrodes éclairées en ultraviolet. L'expérience ci-dessous, très simple, met en évidence le phénomène.



Expérience de Hertz : une plaque de zinc chargée négativement, fixée sur un électroscope, se décharge dès qu'on l'éclaire avec des UV.

Définition – Effet photoélectrique

L'**effet photoélectrique** est l'émission d'électrons par un métal lorsqu'il est éclairé par un rayonnement électromagnétique de fréquence **suffisamment grande**.

Les observations qui ont bousculé la physique

- Il existe une **fréquence seuil** ν_0 (qui dépend du métal) : si $\nu < \nu_0$, **aucun** électron n'est émis, **quelle que soit l'intensité** de la lumière et la durée d'éclairement (lumière visible, même intense, sur le zinc : rien).
- Si $\nu \geq \nu_0$, l'émission est **instantanée**, même avec une lumière très faible.
- Le **nombre** d'électrons émis par seconde augmente avec l'intensité lumineuse, mais leur **énergie cinétique maximale** n'en dépend pas : elle augmente avec la fréquence.

Le modèle ondulatoire prévoit au contraire qu'une onde assez intense, de n'importe quelle fréquence, finisse par arracher des électrons. (Une plaque chargée **positivement** ne se décharge pas : les électrons éjectés sont aussitôt rappelés.)

Définition – Travail d'extraction

Le **travail d'extraction** W (noté aussi W_{ext} ou W_0) est l'énergie **minimale** qu'il faut fournir à un électron pour l'arracher au métal. Il est caractéristique du métal et s'exprime en J ou en eV (par exemple, environ 2,1 eV pour le césium et 4,3 eV pour le zinc).

Interprétation d'Einstein et énergie cinétique maximale des électrons À SAVOIR ÉTABLIR

En 1905, Einstein propose : la lumière est constituée de photons d'énergie $h\nu$, et **un photon est absorbé en totalité par un seul électron** (tout ou rien).

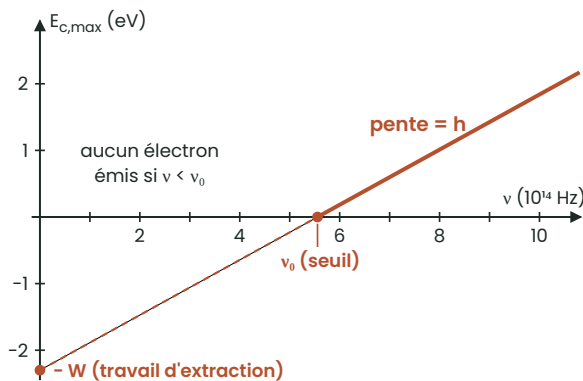
- L'électron reçoit l'énergie $h\nu$. Pour quitter le métal, il doit dépenser **au moins** W . S'il ne dépense que le minimum W , il lui reste l'énergie cinétique la plus grande possible. Par conservation de l'énergie :

$$h\nu = W + E_{c,\text{max}} \quad \Rightarrow \quad \boxed{E_{c,\text{max}} = h\nu - W}$$

Toutes les énergies en J (ou toutes en eV).

- L'émission n'est possible que si $E_{c,\text{max}} \geq 0$, soit $h\nu \geq W$: c'est la condition de seuil, de fréquence seuil $\nu_0 = \frac{W}{h}$ et de longueur d'onde seuil $\lambda_0 = \frac{hc}{W}$ (émission si $\lambda \leq \lambda_0$).

- Augmenter l'intensité, c'est augmenter le nombre de photons, donc le nombre d'électrons émis, **sans** changer l'énergie de chacun : toutes les observations sont expliquées.



Importance historique

L'interprétation d'Einstein (prix Nobel 1921) impose l'idée de **quantum de lumière**.

Millikan, qui cherchait à la réfuter, la confirme

en 1916 en mesurant $E_{c,max}$ en fonction de ν : il obtient une droite dont la pente redonne la

constante h de Planck. C'est l'une des

naissances de la **physique quantique**.

$E_{c,max}$ en fonction de ν : une droite de pente h , identique pour tous les métaux ; elle coupe l'axe en ν_0 .

Exemple résolu – Une cellule au césium

Une plaque de césium ($W = 2,1 \text{ eV}$) est éclairée par une lumière violette de longueur d'onde $\lambda = 400 \text{ nm}$. Données : $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$; $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$.

- Y a-t-il effet photoélectrique ? Calculer la longueur d'onde seuil du césium.
- Calculer l'énergie cinétique maximale et la vitesse maximale des électrons émis.

Solution

1. $E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{400 \times 10^{-9}} = 4,97 \times 10^{-19} \text{ J} = 3,11 \text{ eV}$. Comme $E > W$, il y a effet photoélectrique. Seuil : $\lambda_0 = \frac{hc}{W} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{2,1 \times 1,60 \times 10^{-19}} = 5,9 \times 10^{-7} \text{ m} = 590 \text{ nm}$ (lumière jaune-orangé).

2. $E_{c,max} = E - W = 3,11 - 2,1 = 1,0 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$. Avec $E_{c,max} = \frac{1}{2}m_e v_{max}^2$: $v_{max} = \sqrt{\frac{2E_{c,max}}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \times 1,6 \times 10^{-19}}{9,11 \times 10^{-31}}} = 5,9 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3. Absorption et émission de photons par la matière

L'énergie d'un atome, d'une molécule ou d'un solide ne peut prendre que certaines valeurs : elle est **quantifiée** (1re). Les échanges avec la lumière se font photon par photon.

Absorption et émission

- Absorption** : un système passe du niveau E_1 au niveau $E_2 > E_1$ en absorbant un photon dont l'énergie est **exactement** $h\nu = E_2 - E_1$.
- Émission** : un système passe du niveau E_2 au niveau $E_1 < E_2$ en émettant un photon d'énergie $h\nu = E_2 - E_1$.

$$\Delta E = |E_2 - E_1| = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

ΔE en J ; ν en Hz ; λ en m.

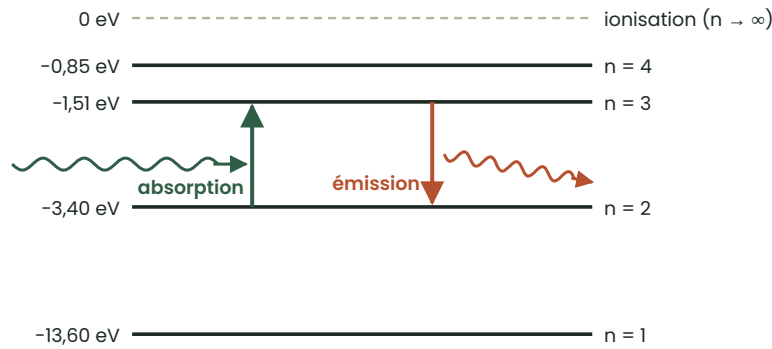


Diagramme simplifié des niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène (axe vertical non à l'échelle) : absorption d'un photon (vert) et émission d'un photon (rouge) entre les niveaux $n = 2$ et $n = 3$.

Exemple résolu – Une raie de l'hydrogène

Calculer la longueur d'onde du photon émis lors de la transition de l'atome d'hydrogène du niveau $n = 3$ ($E_3 = -1,51$ eV) au niveau $n = 2$ ($E_2 = -3,40$ eV).

Solution

$$\Delta E = E_3 - E_2 = -1,51 - (-3,40) = 1,89 \text{ eV} = 1,89 \times 1,60 \times 10^{-19} = 3,024 \times 10^{-19} \text{ J.}$$

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{3,024 \times 10^{-19}} = 6,58 \times 10^{-7} \text{ m} \approx 658 \text{ nm} : \text{c'est la raie rouge H}\alpha \text{ du spectre de l'hydrogène (mesurée à } 656 \text{ nm ; l'écart provient des arrondis des données).}$$

Des photons absorbés ou émis tout autour de nous

- **Photons émis** : lampes à décharge (spectres de raies), lasers, **diodes électroluminescentes** (DEL ou LED : un électron du semi-conducteur perd une énergie de l'ordre de l'énergie de « gap » et émet un photon ; la couleur dépend du matériau), écrans, étoiles.
- **Photons absorbés** : **capteurs de lumière** (photodiodes, photorésistances, capteurs CCD et CMOS des appareils photo où chaque photon absorbé libère un électron), cellules photovoltaïques, rétine, chlorophylle (photosynthèse).
- **Spectroscopies** : en **UV-visible**, les photons absorbés font changer les molécules de niveau électronique (couleur des espèces) ; en **infrarouge**, moins énergétiques, ils font vibrer les liaisons (identification des groupes caractéristiques, fiche 2).

4. La cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque convertit directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Elle est faite d'un semi-conducteur (souvent du silicium) : un photon absorbé, s'il a une énergie supérieure à l'énergie de gap E_g du matériau (1,12 eV pour le silicium), libère un électron qui peut circuler dans le circuit extérieur.

Relation – Rendement d'une cellule photovoltaïque

$$\eta = \frac{P_{\text{électrique}}}{P_{\text{lumineuse}}} = \frac{U \times I}{\mathcal{E} \times S}$$

η : rendement, sans unité (souvent donné en %) ; U : tension aux bornes de la cellule (V) ; I : intensité du courant débité (A) ; $\mathcal{E}$: **éclairement** reçu, puissance lumineuse par unité de surface ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) ; S : surface de la cellule (m^2). Rendements usuels : 15 à 22 % pour le silicium.

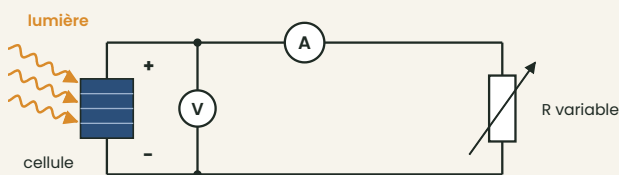
Exemple résolu – Rendement d'un panneau solaire

Un panneau de surface $S = 1,6 \text{ m}^2$ reçoit un éclairement $\mathcal{E} = 800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Il débite $I = 7,0 \text{ A}$ sous une tension $U = 30 \text{ V}$. Calculer son rendement.

Solution

$P_{\text{élec}} = UI = 30 \times 7,0 = 2,1 \times 10^2 \text{ W}$; $P_{\text{lum}} = \mathcal{E} S = 800 \times 1,6 = 1,3 \times 10^3 \text{ W}$; $\eta = \frac{210}{1280} = 0,16$, soit 16 %.

Au labo – Mesurer le rendement d'une cellule photovoltaïque



1. On éclaire la cellule avec une lampe fixe et on mesure l'éclairement $\mathcal{E}$ à sa place avec un **solarimètre** (en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$). On mesure sa surface S .
2. On fait varier la résistance R et on relève U et I : on trace la caractéristique $I = f(U)$, puis $P = UI$ en fonction de U .
3. On repère la puissance maximale P_{max} et on calcule $\eta = \frac{P_{\text{max}}}{\mathcal{E} S}$.

2 Les pièges à éviter

Attention – Les erreurs classiques

- **Oublier de convertir λ en mètres.** Dans $E = hc/\lambda$: $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$, $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$.
- **Mélanger J et eV.** Dans $E_{c,\text{max}} = h\nu - W$, toutes les énergies dans la **même** unité. J $\rightarrow$ eV : diviser par $1,60 \times 10^{-19}$; eV $\rightarrow$ J : multiplier.
- **Croire qu'une lumière plus intense permet l'effet photoélectrique.** Sous le seuil ($\nu < \nu_0$), aucun électron n'est émis, quelle que soit l'intensité. L'intensité change le **nombre** d'électrons, pas leur énergie.
- **Inverser le sens de variation.** $E = hc/\lambda$: plus λ est **petite**, plus le photon est énergétique. Le seuil est une longueur d'onde **maximale** ($\lambda \leq \lambda_0$) mais une fréquence **minimale** ($\nu \geq \nu_0$).
- **Confondre E_c et $E_{c,\text{max}}$.** $h\nu - W$ est l'énergie cinétique **maximale** : les électrons plus profonds dans le métal ressortent avec moins d'énergie.
- **Rendement supérieur à 1 ou mauvaise puissance reçue.** $P_{\text{lum}} = \mathcal{E} \times S$ (éclairement $\times$ surface), et η est toujours inférieur à 1.

3 Ordres de grandeur et unités

Rayonnement	λ	Énergie d'un photon	Grandeur	Valeur
Rayons X	0,1 nm	$\approx 10^4$ eV	Constante de Planck h	$6,63 \times 10^{-34}$ J · s
UV (lampe UV-C)	254 nm	4,9 eV	Électronvolt	1 eV = $1,60 \times 10^{-19}$ J
Violet	400 nm	3,1 eV	Raccourci utile	E (eV) $\approx 1\,240/\lambda$ (nm)
Rouge	800 nm	1,6 eV	Travail d'extraction	Cs 2,1 ; Na 2,3 ; Zn 4,3 ; Cu 4,7 (eV)
IR (télécommande)	950 nm	1,3 eV	Gap du silicium	1,12 eV ($\lambda \leq 1,1 \mu\text{m}$)
Micro-ondes (four)	12 cm	$\approx 10^{-5}$ eV	Éclairement solaire max. au sol	$\approx 1\,000$ W · m ⁻²

4 Exercices

Exercice 1 – Des photons plus ou moins énergétiques ★

Données : $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J · s ; $c = 3,00 \times 10^8$ m · s⁻¹ ; 1 eV = $1,60 \times 10^{-19}$ J.

1. Calculer, en J puis en eV, l'énergie d'un photon UV ($\lambda_1 = 250$ nm), d'un photon orangé ($\lambda_2 = 600$ nm) et d'un photon infrarouge ($\lambda_3 = 1,5 \mu\text{m}$).
2. Calculer la fréquence du photon orangé.
3. Rompre une liaison C–C nécessite environ 3,6 eV. Lequel de ces photons peut la rompre ? Pourquoi les UV sont-ils dangereux pour la peau ?

Exercice 2 – Compter les photons ★

1. Un pointeur laser rouge ($\lambda = 650$ nm) a une puissance de 1,0 mW. Combien de photons émet-il par seconde ?
2. Un photodétecteur très sensible reçoit $2,0 \times 10^6$ photons par seconde de longueur d'onde 500 nm. Quelle puissance lumineuse reçoit-il ?

Exercice 3 – Retour sur l'expérience de Hertz ★★

Le travail d'extraction du zinc est $W = 4,3$ eV.

1. Calculer la longueur d'onde seuil λ_0 du zinc. Dans quel domaine se situe-t-elle ?
2. Expliquer pourquoi une lampe blanche très puissante ne décharge pas l'électroscope, alors qu'une faible lampe UV ($\lambda = 254$ nm) le décharge.
3. Une plaque de verre ordinaire absorbe les rayonnements de longueur d'onde inférieure à environ 330 nm. Que se passe-t-il si on l'interpose entre la lampe UV et le zinc ?
4. Calculer l'énergie cinétique maximale (en eV) des électrons arrachés par la lampe UV.

Exercice 4 – Retrouver la constante de Planck ★★

On éclaire une cellule photoélectrique au potassium avec différentes radiations et on mesure l'énergie cinétique maximale des électrons émis :

ν (10^{14} Hz)	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
$E_{c,\max}$ (eV)	0,19	0,60	1,02	1,43	1,84

1. Tracer $E_{c,\max}$ en fonction de ν . La relation d'Einstein est-elle vérifiée ?
2. Déterminer la pente de la droite en eV · s, puis en J · s. Comparer à h .
3. En déduire le travail d'extraction W du potassium (en eV) et sa fréquence seuil ν_0 .

Exercice 5 – La diode électroluminescente ★★

Une DEL bleue émet une lumière de longueur d'onde 460 nm ; une DEL rouge, de longueur d'onde 630 nm.

1. Calculer l'énergie (en eV) des photons émis par chacune. Ces photons sont-ils absorbés ou émis par le semi-conducteur ?
2. Pour qu'une DEL s'allume, la tension à ses bornes doit dépasser une tension seuil U_s telle que eU_s soit de l'ordre de l'énergie d'un photon émis. Estimer U_s pour chaque DEL.
3. La DEL bleue, alimentée sous 3,0 V par un courant de 20 mA, émet une puissance lumineuse de 20 mW. Calculer le nombre de photons émis par seconde et le rendement de la DEL.

Exercice 6 – Des panneaux solaires sur le toit (type bac) ★★★

Document 1 – Le silicium. Dans une cellule au silicium, un photon est absorbé et libère un électron s'il a une énergie au moins égale à l'énergie de gap $E_g = 1,12$ eV. L'énergie éventuellement en excès est dissipée sous forme thermique.

Document 2 – Caractéristique d'un panneau de surface $S = 1,65 \text{ m}^2$ sous un éclairement $\mathcal{E} = 1\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$:

U (V)	0	10	20	25	30	32	34	36	38
I (A)	9,5	9,4	9,2	9,0	8,5	8,0	6,8	4,5	0

Document 3 – Le projet. Une famille veut couvrir une consommation électrique moyenne de 7,0 kWh par jour. Sur l'année, l'énergie solaire reçue équivaut en moyenne à 3,5 h par jour d'éclairement à $1\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Les panneaux fonctionnent toujours à puissance maximale.

1. Montrer qu'un photon n'est absorbé par le silicium que si sa longueur d'onde est inférieure à une valeur λ_g à calculer. Dans quel domaine est λ_g ?
2. Un photon de longueur d'onde 500 nm est absorbé. Quelle part de son énergie (en eV) est dissipée sous forme thermique ? Citer deux causes qui limitent le rendement d'une cellule.
3. À l'aide du document 2, calculer la puissance électrique pour chaque point de mesure. En déduire la puissance maximale $P_{\max}$ et la tension correspondante.
4. Calculer le rendement du panneau.
5. Calculer l'énergie électrique produite par un panneau en une journée moyenne, puis le nombre minimal de panneaux nécessaires au projet.

6. Estimer l'ordre de grandeur du nombre de photons reçus par seconde par un panneau, en supposant qu'ils ont tous une longueur d'onde de 600 nm.

5 Teste-toi (QCM)

- 1 L'énergie d'un photon de longueur d'onde λ vaut :
A. $h\lambda$ **B.** $\frac{hc}{\lambda}$ **C.** $\frac{h\lambda}{c}$ **D.** $\frac{\lambda}{hc}$
- 2 On double l'intensité d'une lumière monochromatique. L'énergie de chaque photon :
A. double **B.** est divisée par 2 **C.** ne change pas **D.** est multipliée par 4
- 3 Un métal éclairé en dessous de sa fréquence seuil :
A. émet des électrons lents **B.** émet des électrons si la lumière est assez intense
C. émet des électrons au bout d'un certain temps **D.** n'émet aucun électron
- 4 Un photon d'énergie 5,0 eV arrache un électron à un métal de travail d'extraction 3,0 eV. L'énergie cinétique maximale de l'électron est :
A. 8,0 eV **B.** 5,0 eV **C.** 3,0 eV **D.** 2,0 eV
- 5 Un atome passe d'un niveau d'énergie -1,51 eV à un niveau -3,40 eV :
A. il absorbe un photon de 1,89 eV **B.** il émet un photon de 1,89 eV
C. il émet un photon de 4,91 eV **D.** il n'y a pas d'échange de photon
- 6 Une cellule de 0,010 m² éclairée à 1 000 W · m⁻² fournit 1,5 W. Son rendement vaut :
A. 1,5 % **B.** 15 % **C.** 67 % **D.** 150 %

L'essentiel à retenir

- Dualité onde-particule : propagation → modèle ondulatoire ; échanges d'énergie → photons.
- Photon : masse nulle, vitesse c , énergie $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ ($h = 6,63 \times 10^{-34}$ J · s) ; 1 eV = $1,60 \times 10^{-19}$ J.
- Flux de photons : $N = \frac{P}{h\nu}$ photons par seconde (P en W).
- Effet photoélectrique : émission d'électrons par un métal éclairé si $\nu \geq \nu_0$, quelle que soit l'intensité.
- Einstein : un photon est absorbé par un seul électron ; $E_{c,\max} = h\nu - W$.
- Seuil : $\nu_0 = \frac{W}{h}$, $\lambda_0 = \frac{hc}{W}$.
- Absorption ou émission entre deux niveaux : $|E_2 - E_1| = h\nu$.
- Applications : capteurs (CCD, CMOS), cellules photovoltaïques, DEL, spectroscopies.
- Rendement photovoltaïque : $\eta = \frac{UI}{\mathcal{E}S}$ ($\mathcal{E}$ en W · m⁻², S en m²).

6 Corrigés

Exercice 1

$$1. E = \frac{hc}{\lambda} \text{ avec } hc = 1,99 \times 10^{-25} \text{ J} \cdot \text{m. UV : } E_1 = \frac{1,99 \times 10^{-25}}{250 \times 10^{-9}} = 7,96 \times 10^{-19} \text{ J} = 4,97 \text{ eV. Orangé : } E_2 = 3,32 \times 10^{-19} \text{ J} = 2,07 \text{ eV. IR : } E_3 = \frac{1,99 \times 10^{-25}}{1,5 \times 10^{-6}} = 1,3 \times 10^{-19} \text{ J} = 0,83 \text{ eV.}$$

$$2. \nu_2 = \frac{c}{\lambda_2} = \frac{3,00 \times 10^8}{600 \times 10^{-9}} = 5,00 \times 10^{14} \text{ Hz (ou } \nu_2 = E_2/h).$$

3. Seul le photon UV (4,97 eV > 3,6 eV) peut rompre la liaison. Les photons UV peuvent casser des liaisons dans les molécules de la peau (dont l'ADN) : coups de soleil, risques de cancer.

Exercice 2

$$1. E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{650 \times 10^{-9}} = 3,06 \times 10^{-19} \text{ J ; } N = \frac{P}{E} = \frac{1,0 \times 10^{-3}}{3,06 \times 10^{-19}} = 3,3 \times 10^{15} \text{ photons} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$$2. P = N \frac{hc}{\lambda} = 2,0 \times 10^6 \times \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{500 \times 10^{-9}} = 2,0 \times 10^6 \times 3,98 \times 10^{-19} = 8,0 \times 10^{-13} \text{ W.}$$

Exercice 3

$$1. \lambda_0 = \frac{hc}{W} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{4,3 \times 1,60 \times 10^{-19}} = 2,9 \times 10^{-7} \text{ m} = 290 \text{ nm : domaine } \mathbf{ultraviolet}.$$

2. La lumière blanche contient des longueurs d'onde de 400 à 800 nm, toutes supérieures à λ_0 : chaque photon a une énergie inférieure à W et ne peut pas arracher d'électron, même s'il y en a énormément (un photon agit seul). Les photons de la lampe UV (254 nm < λ_0) ont assez d'énergie : même peu nombreux, ils arrachent des électrons.

3. Le verre absorbe les photons de 254 nm : ceux qui le traversent ont $\lambda > 330 \text{ nm} > \lambda_0$, il n'y a plus d'effet photoélectrique ; l'électroscope reste chargé.

$$4. E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{254 \times 10^{-9}} = 7,83 \times 10^{-19} \text{ J} = 4,89 \text{ eV ; } E_{c,\max} = 4,89 - 4,3 = 0,6 \text{ eV.}$$

Exercice 4

1. Les points sont alignés sur une droite qui ne passe pas par l'origine : $E_{c,\max} = k\nu - W$, conforme à la relation d'Einstein.

$$2. \text{ Avec deux points éloignés : } k = \frac{1,84 - 0,19}{(10,0 - 6,0) \times 10^{14}} = 4,13 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s, soit } k = 4,13 \times 10^{-15} \times 1,60 \times 10^{-19} = 6,6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s : on retrouve la constante de Planck.}$$

$$3. W = k\nu - E_{c,\max} = 4,13 \times 10^{-15} \times 6,0 \times 10^{14} - 0,19 = 2,29 \text{ eV} \approx 2,3 \text{ eV (ordonnée à l'origine } -W \text{ par prolongement de la droite). } \nu_0 = \frac{W}{k} = \frac{2,29}{4,13 \times 10^{-15}} = 5,5 \times 10^{14} \text{ Hz (abscisse où la droite coupe l'axe des } \nu).$$

Exercice 5

1. Bleue : $E = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{460 \times 10^{-9}} = 4,32 \times 10^{-19} \text{ J} = 2,70 \text{ eV}$. Rouge : $E = 3,16 \times 10^{-19} \text{ J} = 1,97 \text{ eV}$. Ces photons sont **émis** par le semi-conducteur (un électron perd de l'énergie).

2. $U_s \approx \frac{E}{e}$: environ 2,7 V pour la DEL bleue et 2,0 V pour la rouge (une énergie de 2,70 eV correspond à 2,70 V pour un électron).

3. $N = \frac{P}{E} = \frac{20 \times 10^{-3}}{4,32 \times 10^{-19}} = 4,6 \times 10^{16} \text{ photons} \cdot \text{s}^{-1}$. $P_{\text{elec}} = UI = 3,0 \times 20 \times 10^{-3} = 60 \text{ mW}$, d'où $\eta = \frac{20}{60} = 0,33$, soit 33 %.

Exercice 6

1. Absorption si $\frac{hc}{\lambda} \geq E_g$, soit $\lambda \leq \lambda_g = \frac{hc}{E_g} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{1,12 \times 1,60 \times 10^{-19}} = 1,11 \times 10^{-6} \text{ m} = 1,11 \mu\text{m}$: proche **infrarouge**. Tout le visible est absorbé.

2. $E = \frac{hc}{\lambda} = 3,98 \times 10^{-19} \text{ J} = 2,49 \text{ eV}$; énergie dissipée : $2,49 - 1,12 = 1,37 \text{ eV}$ (plus de la moitié).

Causes : photons de $\lambda > \lambda_g$ non absorbés ; énergie en excès des photons absorbés perdue sous forme thermique (et aussi réflexion, pertes par effet Joule...).

3. $P = UI : 0 ; 94 ; 184 ; 225 ; 255 ; 256 ; 231 ; 162 ; 0 \text{ W}$. $P_{\text{max}} \approx 256 \text{ W}$, obtenue pour $U \approx 32 \text{ V}$ ($I = 8,0 \text{ A}$).

4. $\eta = \frac{P_{\text{max}}}{\mathcal{E} S} = \frac{256}{1\,000 \times 1,65} = 0,155$, soit environ 15,5 %.

5. $E_{\text{jour}} = P_{\text{max}} \times \Delta t = 256 \text{ W} \times 3,5 \text{ h} = 896 \text{ Wh} = 0,90 \text{ kWh}$. Nombre de panneaux : $\frac{7,0}{0,896} = 7,8$, donc au minimum **8 panneaux**.

6. $P_{\text{lum}} = \mathcal{E} S = 1,65 \times 10^3 \text{ W}$; $E_{\text{photon}} = \frac{hc}{600 \times 10^{-9}} = 3,3 \times 10^{-19} \text{ J}$; $N = \frac{1,65 \times 10^3}{3,3 \times 10^{-19}} \approx 5 \times 10^{21}$ photons par seconde.

QCM

1. **B**. · 2. **C** : l'énergie d'un photon ne dépend que de ν ; il y a deux fois plus de photons. · 3. **D** : sous le seuil, aucun photon n'a assez d'énergie. · 4. **D** : $5,0 - 3,0 = 2,0 \text{ eV}$. · 5. **B** : l'énergie diminue de 1,89 eV, un photon de cette énergie est émis. · 6. **B** : $\eta = \frac{1,5}{1\,000 \times 0,010} = 0,15$.