

Effet photoélectrique et interactions lumière-matière

COURS • P16 • TERMINALE

Spécialité de terminale, programme officiel. Cours original rédigé avec une IA. Le cours de ton enseignant fait foi.

Sommaire du cours

Ce que tu dois savoir faire	1
Cours	1
Exemples résolus	6
Méthodes et pièges	7
Vers le PASS	8
Exercices	8
Corrigés	10

Ce que tu dois savoir faire

- Décrire l'effet photoélectrique, ses caractéristiques expérimentales et son importance historique.
- Expliquer pourquoi le modèle ondulatoire de la lumière ne rend pas compte de l'effet photoélectrique, et l'interpréter à l'aide du modèle du photon.
- Calculer l'énergie d'un photon à partir de sa fréquence ou de sa longueur d'onde, en joules et en électronvolts.
- Établir, par un bilan d'énergie, la relation $E_{c,max} = h\nu - W$ entre l'énergie cinétique maximale des électrons émis et la fréquence de la lumière.
- Déterminer une fréquence seuil ou une longueur d'onde seuil à partir du travail d'extraction, et exploiter le graphique de $E_{c,max}$ en fonction de ν .
- Calculer un nombre de photons par seconde à partir d'une puissance lumineuse.
- Décrire les processus d'absorption et d'émission d'un photon par un atome à l'aide d'un diagramme de niveaux d'énergie.
- Exploiter la caractéristique d'une cellule photovoltaïque et calculer son rendement.
- Citer et expliquer des applications de l'interaction photon-matière : photodiode, cellule photovoltaïque, diode électroluminescente, capteurs d'images, spectroscopies.

Cours

1. Le photon : rappels

La lumière présente une **dualité onde-particule**. Elle se comporte comme une onde (diffraction, interférences) et, dans ses échanges d'énergie avec la matière, comme un ensemble de particules appelées **photons**. Le photon a une masse nulle, se déplace à la célérité c dans le vide et transporte un **quantum** d'énergie :

$$E = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda$$

- E : énergie du photon, en joules (J) ;
- $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J·s : constante de Planck ;
- ν : fréquence de la radiation, en hertz (Hz) ;
- $c = 3,00 \times 10^8$ m·s⁻¹ : célérité de la lumière dans le vide ;
- λ : longueur d'onde dans le vide, en mètres.

Les énergies en jeu à l'échelle atomique sont très petites ; on utilise souvent l'**électronvolt** : 1 eV = 1,60 × 10⁻¹⁹ J, énergie acquise par un électron accéléré sous une tension de 1 V. Un calcul utile : $h \cdot c = 6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8 = 1,99 \times 10^{-25}$ J·m, soit environ 1,24 × 10⁻⁶ eV·m. Avec λ en nanomètres, E (en eV) $\approx 1240 / \lambda$ (en nm). Un photon de lumière visible porte donc entre 1,6 eV environ (rouge, 780 nm) et 3,1 eV (violet, 400 nm) ; un photon ultraviolet porte davantage, un photon infrarouge moins.

Flux de photons. Une source monochromatique de puissance P émet N photons par seconde, chacun d'énergie $h \cdot \nu$:

$$N = P / (h \cdot \nu)$$

Un pointeur laser de 1,0 mW à 650 nm émet des photons de $3,06 \times 10^{-19}$ J, donc $1,0 \times 10^{-3} / 3,06 \times 10^{-19} = 3,3 \times 10^{15}$ photons par seconde. Le nombre est si grand que la lumière paraît continue à notre échelle.

2. L'effet photoélectrique : les faits expérimentaux

En 1887, Heinrich Hertz constate qu'une étincelle éclate plus facilement entre deux électrodes éclairées par de l'ultraviolet. Peu après, on montre qu'une plaque de zinc fraîchement décapée, fixée sur un électroscope chargé négativement, se décharge lorsqu'on l'éclaire avec une lampe à vapeur de mercure riche en ultraviolet. Interposer une plaque de verre, qui absorbe l'ultraviolet, arrête la décharge. Si l'électroscope est chargé positivement, rien ne se passe.

On appelle **effet photoélectrique** l'émission d'électrons par un métal sous l'effet d'un rayonnement électromagnétique. L'interprétation de l'expérience est que la lumière arrache des électrons au zinc : la plaque chargée négativement les perd et se décharge ; chargée positivement, elle rappelle les électrons arrachés.

Les expériences précises, menées notamment avec une **cellule photoélectrique** (cathode métallique et anode dans une ampoule vide), établissent trois faits :

- **Existence d'un seuil.** L'émission n'a lieu que si la fréquence ν de la lumière est supérieure à une **fréquence seuil** ν_0 propre au métal (ou si λ est inférieure à une longueur d'onde seuil λ_0). En dessous du seuil, aucun électron n'est émis, **quelle que soit l'intensité** de la lumière. Au-dessus, l'émission a lieu même avec une lumière très faible.
- **Énergie indépendante de l'intensité.** L'énergie cinétique maximale des électrons émis augmente avec la fréquence de la lumière, mais ne dépend pas de son intensité. Augmenter l'intensité augmente seulement le **nombre** d'électrons émis par seconde, donc l'intensité du courant.
- **Instantanéité.** L'émission commence sans délai mesurable dès que la lumière arrive, même très faible.

3. L'échec du modèle ondulatoire et l'interprétation d'Einstein

Dans le modèle ondulatoire, l'énergie d'une onde lumineuse est répartie continûment et est proportionnelle à son intensité. Une lumière intense, même de basse fréquence, devrait finir par fournir assez d'énergie à un électron pour l'extraire ; une lumière très faible devrait mettre un certain temps à accumuler cette énergie. Les trois faits expérimentaux contredisent ces prévisions.

En 1905, Albert Einstein propose que la lumière échange son énergie avec la matière par **quanta indivisibles**, les photons, d'énergie $h \cdot \nu$. L'effet photoélectrique est alors une interaction **entre un photon et un électron** :

- un photon est absorbé en totalité par un seul électron, ou pas du tout ;
- l'électron ne peut sortir du métal que si l'énergie reçue dépasse l'énergie minimale nécessaire pour l'extraire ;
- l'intensité lumineuse fixe le nombre de photons, donc le nombre d'électrons émis, pas l'énergie de chacun ;
- l'interaction étant individuelle, il n'y a aucun temps d'accumulation.

Ce travail, confirmé par les mesures de Robert Millikan en 1914 à 1916, vaut à Einstein le prix Nobel de physique en 1921. L'effet photoélectrique est historiquement la première preuve convaincante de l'aspect corpusculaire de la lumière et l'un des fondements de la physique quantique.

Effet photoélectrique

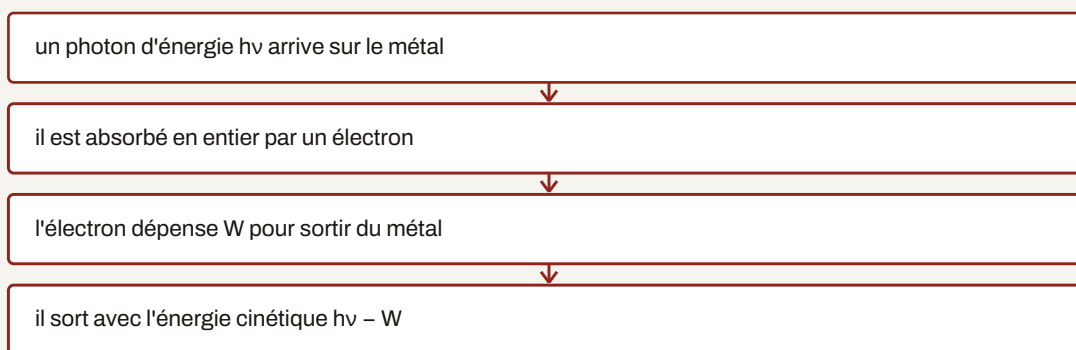


Schéma de principe original • lire les conditions et limites dans le texte

4. Travail d'extraction et bilan d'énergie

Les électrons de conduction d'un métal sont libres de se déplacer à l'intérieur du métal, mais ils y sont retenus. On appelle **travail d'extraction** W (ou W_0) l'énergie minimale qu'il faut fournir pour extraire un électron du métal. Il dépend du métal :

Métal	césium	potassium	sodium	calcium	zinc	cuivre
W (eV), valeur usuelle	1,9	2,3	2,3	2,9	4,3	4,7

(Ces valeurs varient légèrement selon l'état de surface du métal.)

Bilan d'énergie. L'électron qui absorbe un photon reçoit l'énergie $h \cdot \nu$. Il en dépense au moins W pour quitter le métal ; le reste se retrouve sous forme d'énergie cinétique. Les électrons les moins liés, qui ne dépensent que W , sortent avec l'énergie cinétique maximale :

$$E_{c,max} = h \cdot \nu - W$$

Les autres électrons, plus profonds dans le métal, perdent davantage d'énergie et sortent avec une énergie cinétique plus faible.

Seuil. L'émission n'est possible que si $E_{c,max} \geq 0$, donc $h \cdot \nu \geq W$. La **fréquence seuil** et la **longueur d'onde seuil** valent :

$$\nu_0 = W / h \text{ et } \lambda_0 = h \cdot c / W$$

Il y a émission si $\nu > \nu_0$, c'est-à-dire si $\lambda < \lambda_0$. Pour le zinc ($W = 4,3 \text{ eV} = 6,88 \times 10^{-19} \text{ J}$), $\lambda_0 = 1,99 \times 10^{-25} / 6,88 \times 10^{-19} = 2,89 \times 10^{-7} \text{ m} = 289 \text{ nm}$: seul l'ultraviolet extrait des électrons, ce qui explique le rôle de la plaque de verre dans l'expérience de Hertz. Pour le césium, $\lambda_0 \approx 650 \text{ nm}$: la lumière visible suffit, c'est pourquoi les métaux alcalins ont servi à fabriquer les premières cellules photoélectriques.

Vitesse des électrons émis. De $E_{c,max} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$, on tire $v = \sqrt{(2 \cdot E_{c,max} / m)}$, avec $m = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$, masse de l'électron, et E_c en joules.

Représentation graphique. La courbe de $E_{c,max}$ en fonction de ν est une **droite** de coefficient directeur h , qui coupe l'axe des abscisses en ν_0 et dont le prolongement coupe l'axe des ordonnées en $-W$. Le coefficient directeur est le même pour tous les métaux : c'est ainsi que Millikan a mesuré h avec précision. Seule l'abscisse à l'origine change d'un métal à l'autre.

Un photon frappe un métal

$h\nu$ inférieur à W : pas d'émission, quelle que soit l'intensité

$h\nu$ supérieur à W : émission, $E_{c,max} = h\nu - W$

Repères complémentaires, sans séquence causale

5. Absorption et émission de photons par un atome

L'énergie d'un atome est **quantifiée** : elle ne peut prendre que certaines valeurs, appelées **niveaux d'énergie**, représentés sur un diagramme vertical. Le niveau le plus bas est l'**état fondamental**, les autres sont des **états excités**. Par convention, l'énergie de l'atome ionisé au repos est prise nulle : les niveaux liés ont des énergies négatives. Pour l'atome d'hydrogène, $E_n = -13,6 / n^2$ (en eV), n entier non nul.

Absorption. Un atome dans un état d'énergie E_n peut absorber un photon et passer à un niveau supérieur E_p **seulement** si l'énergie du photon est exactement égale à l'écart entre les niveaux :

$$h \cdot \nu = E_p - E_n$$

Un photon d'énergie différente traverse l'atome sans être absorbé. C'est l'origine des **raies noires** d'un spectre d'absorption. Exception : si l'énergie du photon dépasse l'énergie d'ionisation, l'atome perd un électron, qui emporte l'excédent sous forme d'énergie cinétique ; cette ionisation n'exige pas une énergie précise, c'est l'analogue atomique de l'effet photoélectrique.

Émission spontanée. Un atome excité revient spontanément vers un niveau inférieur en émettant un photon d'énergie égale à l'écart entre les niveaux : $h \cdot \nu = E_p - E_n$. C'est l'origine des **raies colorées** des spectres d'émission (lampes à vapeur de sodium, de mercure, néons). Un même atome absorbe et émet donc les mêmes longueurs d'onde : les spectres de raies sont la signature d'un élément chimique.

Émission stimulée. Un troisième processus existe : un photon d'énergie égale à $E_p - E_n$ peut provoquer la désexcitation d'un atome déjà excité, qui émet alors un photon identique (même énergie, même direction, même phase). Ce processus est à la base du fonctionnement du **laser**.

Dans les molécules et les solides, les niveaux sont plus nombreux et peuvent former des bandes. Dans les molécules, l'absorption d'ultraviolet ou de visible correspond à des transitions électroniques (spectroscopie UV-visible, couleur des espèces chimiques), l'absorption d'infrarouge à des transitions de vibration des liaisons (spectroscopie infrarouge).

6. Semi-conducteurs : photodiode, cellule photovoltaïque, DEL

Dans un **semi-conducteur** comme le silicium, les électrons ne peuvent occuper que deux bandes d'énergie séparées par une **bande interdite** de largeur E_g (le « gap ») : 1,12 eV pour le silicium. Un électron qui reçoit au moins E_g passe de la bande inférieure à la bande supérieure : il devient libre de se déplacer et laisse derrière lui un « trou », place vacante qui se comporte comme une charge positive mobile.

Absorption par un semi-conducteur : photodétection. Un photon d'énergie $h \cdot \nu \geq E_g$ peut créer une paire électron-trou. Un photon d'énergie inférieure à E_g n'est pas absorbé. La longueur d'onde maximale détectée vaut donc $\lambda_{\max} = h \cdot c / E_g$: pour le silicium, $\lambda_{\max} \approx 1\,240 / 1,12 \approx 1\,100$ nm, dans l'infrarouge proche. Le silicium détecte ainsi tout le visible et le proche infrarouge.

- Dans une **photodiode**, les paires créées produisent un courant proportionnel au nombre de photons reçus par seconde, donc à la puissance lumineuse : c'est un capteur de lumière (télécommandes, lecteurs de codes, mesures d'éclairement).
- Les **capteurs d'images** des appareils photo et des téléphones sont des matrices de millions de photodiodes, les pixels.

Cellule photovoltaïque. C'est une photodiode utilisée comme générateur : les paires électron-trou créées par la lumière sont séparées par le champ électrique interne de la jonction, ce qui fait circuler un courant dans un circuit extérieur. Elle convertit l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Sa **caractéristique** $I(U)$ sous un éclairage donné part de l'**intensité de court-circuit** I_{cc} (pour $U = 0$), reste presque constante, puis chute jusqu'à zéro à la **tension à vide** U_0 (environ 0,6 V pour une cellule au silicium). La puissance électrique fournie $P = U \cdot I$ est nulle aux deux extrémités et passe par un **maximum** $P_{\max}$ pour un point de fonctionnement particulier, que l'on obtient en choisissant convenablement la résistance de charge ($R = U/I$ en ce point). Les panneaux solaires associent de nombreuses cellules en série et en parallèle.

Le **rendement** d'une cellule photovoltaïque est le rapport de la puissance électrique fournie à la puissance lumineuse reçue :

$$\eta = P_{\text{élec}} / P_{\text{lum}} = U \cdot I / (E \cdot S)$$

avec E l'**éclairement** (puissance lumineuse reçue par unité de surface, en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) et S la surface de la cellule (m^2). Le rendement est sans unité, souvent exprimé en pourcentage : de 15 % à 22 % environ pour les panneaux au silicium du commerce. Il est limité notamment parce que les photons d'énergie inférieure à E_g ne sont pas absorbés, et que l'excédent d'énergie des photons d'énergie supérieure à E_g

est perdu en chaleur.

Diode électroluminescente (DEL). C'est le processus inverse : un courant injecte des électrons et des trous qui se recombinent en émettant un photon d'énergie voisine de E_g . La couleur d'une DEL est donc fixée par le matériau : $\lambda \approx h \cdot c / E_g$. Un gap de 1,9 eV donne du rouge (environ 650 nm), un gap de 2,7 eV du bleu (environ 460 nm). Les DEL blanches associent une DEL bleue à une couche luminescente qui réémet du jaune. Comme l'énergie électrique est convertie directement en photons, sans passer par l'échauffement d'un filament, le rendement lumineux d'une DEL est bien supérieur à celui d'une lampe à incandescence.

Applications de l'interaction photon-matière

photodiode et capteur d'images : photon absorbé, courant

cellule photovoltaïque : photon absorbé, puissance électrique

DEL et laser : courant ou excitation, photon émis

spectroscopies UV-visible et infrarouge : absorption sélective, identification des espèces

Repères complémentaires, sans séquence causale

Dispositif	Conversion	Condition sur le photon
Cellule photoélectrique (métal)	lumière $\rightarrow$ électrons libres	$h \cdot \nu \geq W$
Photodiode, cellule photovoltaïque	lumière $\rightarrow$ énergie électrique	$h \cdot \nu \geq E_g$
DEL	énergie électrique $\rightarrow$ lumière	$h \cdot \nu \approx E_g$
Atome (absorption, émission)	photon $\leftrightarrow$ excitation	$h \cdot \nu = E_p - E_n$ exactement

Exemples résolus

Exemple 1 : électrons arrachés au potassium

Énoncé. Une cathode de potassium ($W = 2,30$ eV) est éclairée par une radiation de longueur d'onde $\lambda = 400$ nm. a) Calculer l'énergie d'un photon en joules et en électronvolts. b) Y a-t-il émission d'électrons ? c) Calculer l'énergie cinétique maximale des électrons émis et leur vitesse maximale. d) Calculer la longueur d'onde seuil du potassium. 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 ; $m = 9,11 \times 10^{-31}$ kg.

Résolution. a) $E = h \cdot c / \lambda = 6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8 / 400 \times 10^{-9} = 4,97 \times 10^{-19}$ J. En eV : $4,97 \times 10^{-19} / 1,60 \times 10^{-19} = 3,11$ eV. b) $E = 3,11$ eV > $W = 2,30$ eV : il y a émission d'électrons. c) $E_{c,max} = E - W = 3,11 - 2,30 = 0,81$ eV = $0,81 \times 1,60 \times 10^{-19} = 1,3 \times 10^{-19}$ J. $v = \sqrt{(2 \cdot E_{c,max} / m)} = \sqrt{(2 \times 1,29 \times 10^{-19} / 9,11 \times 10^{-31})} = \sqrt{(2,83 \times 10^{11})} = 5,3 \times 10^5$ m·s⁻¹. d) $\lambda_0 = h \cdot c / W$, avec $W = 2,30 \times 1,60 \times 10^{-19} = 3,68 \times 10^{-19}$ J : $\lambda_0 = 1,99 \times 10^{-25} / 3,68 \times 10^{-19} = 5,40 \times 10^{-7}$ m. $\lambda_0 \approx 540$ nm : toute radiation de longueur d'onde inférieure (vert, bleu, violet,

ultraviolet) extrait des électrons du potassium.

Exemple 2 : rendement d'un panneau solaire

Énoncé. Un panneau photovoltaïque de surface $S = 1,6 \text{ m}^2$ reçoit un éclairement $E = 800 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. À son point de puissance maximale, il délivre une tension $U = 30 \text{ V}$ et une intensité $I = 8,0 \text{ A}$. a) Calculer la puissance lumineuse reçue. b) Calculer la puissance électrique fournie. c) Calculer le rendement. d) Quelle énergie électrique fournit-il en 5,0 h dans ces conditions ?

Résolution. a) $P_{\text{lum}} = E \cdot S = 800 \times 1,6 = 1,28 \times 10^3 \text{ W}$. b) $P_{\text{elec}} = U \cdot I = 30 \times 8,0 = 240 \text{ W}$. c) $\eta = P_{\text{elec}} / P_{\text{lum}} = 240 / 1\,280 = 0,1875$. $\eta \approx 19 \%$. Les 81 % restants sont principalement convertis en énergie thermique ou réfléchis. d) Énergie = $P_{\text{elec}} \times \Delta t = 240 \times 5,0 \times 3\,600 = 4,3 \times 10^6 \text{ J}$, soit $240 \times 5,0 = 1,2 \times 10^3 \text{ Wh}$. 1,2 kWh.

Exemple 3 : mesurer la constante de Planck

Énoncé. Avec une cathode de sodium, on mesure l'énergie cinétique maximale des électrons émis pour plusieurs fréquences :

ν (10^{14} Hz)	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
$E_{c,\text{max}}$ (eV)	0,21	0,62	1,04	1,45	1,86

a) Montrer que les points sont alignés et calculer le coefficient directeur de la droite. b) En déduire la constante de Planck en J·s. c) Déterminer le travail d'extraction du sodium et sa fréquence seuil.

Résolution. a) Entre deux colonnes successives, ν augmente de $1,0 \times 10^{14} \text{ Hz}$ et $E_{c,\text{max}}$ de 0,41 ou 0,42 eV : l'accroissement est constant, **les points sont alignés**. Coefficient directeur : $k = (1,86 - 0,21) / (10,0 - 6,0) \times 10^{14} = 1,65 / 4,0 \times 10^{14} = 4,13 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$. b) D'après $E_{c,\text{max}} = h \cdot \nu - W$, le coefficient directeur est h . $h = 4,13 \times 10^{-15} \times 1,60 \times 10^{-19} = 6,6 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$. $h \approx 6,6 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, en accord avec la valeur admise. c) $W = h \cdot \nu - E_{c,\text{max}}$, avec le premier point : $W = 4,13 \times 10^{-15} \times 6,0 \times 10^{14} - 0,21 = 2,48 - 0,21 = 2,27 \text{ eV}$ (environ 2,3 eV). Fréquence seuil : $\nu_0 = W/h = 2,27 / 4,13 \times 10^{-15} = 5,5 \times 10^{14} \text{ Hz}$, soit $\lambda_0 = c/\nu_0 = 3,00 \times 10^8 / 5,5 \times 10^{14} = 5,5 \times 10^{-7} \text{ m} = 550 \text{ nm}$ environ.

Méthodes et pièges

- Méthode type : calcule l'énergie du photon, convertis-la dans la même unité que W , compare : si $h \cdot \nu < W$, rien n'est émis ; sinon, $E_{c,\text{max}} = h \cdot \nu - W$.
- Pour passer des joules aux électronvolts, divise par $1,60 \times 10^{-19}$; pour le sens inverse, multiplie. Ne mélange jamais les deux unités dans une soustraction.
- Pour calculer une vitesse avec $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$, l'énergie doit être en joules et la masse en kilogrammes.
- Ne confonds pas intensité et fréquence : augmenter l'intensité augmente le nombre d'électrons émis (le courant), pas leur énergie ; seule la fréquence agit sur l'énergie.
- Une longueur d'onde plus grande signifie un photon moins énergétique : le seuil photoélectrique est une longueur d'onde maximale (émission si $\lambda < \lambda_0$).
- Pour un atome isolé, l'absorption exige une énergie exactement égale à un écart entre niveaux ; pour l'effet photoélectrique ou l'ionisation, toute énergie supérieure au seuil convient.

- Dans le calcul d'un rendement photovoltaïque, la puissance reçue est $E \times S$: vérifie que la surface est en m^2 ($100 \text{ cm}^2 = 1,00 \times 10^{-2} \text{ m}^2$).
- Sur une caractéristique $I(U)$, cherche le maximum du produit $U \cdot I$, pas le maximum de I ni celui de U .

Vers le PASS

En PASS, l'interaction photon-matière est au cœur de la biophysique des rayonnements. Pour les photons X et gamma utilisés en imagerie médicale et en radiothérapie, l'effet photoélectrique devient l'interaction avec un électron des couches profondes d'un atome (couche K), en compétition avec l'effet Compton et la création de paires. Sa probabilité augmente fortement avec le numéro atomique du milieu, ce qui explique le contraste entre os et tissus mous en radiographie et l'usage de produits de contraste iodés. On y relie aussi l'atténuation des faisceaux, le réarrangement électronique qui suit l'éjection (photons de fluorescence, électrons Auger) et les détecteurs de rayonnements. Les calculs en électronvolts, kiloélectronvolts et mégaélectronvolts doivent alors être immédiats.

Suite en PASS : Radioactivité, interactions et dosimétrie

Exercices

Données pour tous les exercices : $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$; $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$; $e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$; masse de l'électron $m = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$.

Niveau 1 : s'entraîner

1. Calculer l'énergie, en joules puis en électronvolts, d'un photon ultraviolet de longueur d'onde $\lambda = 250 \text{ nm}$.
2. Le travail d'extraction du zinc vaut $W = 4,3 \text{ eV}$. a) Calculer sa longueur d'onde seuil. b) Une plaque de zinc éclairée en lumière visible émet-elle des électrons ?
3. Une plaque de cuivre ($W = 4,7 \text{ eV}$) est éclairée par un rayonnement ultraviolet de longueur d'onde 200 nm . Calculer l'énergie cinétique maximale des électrons émis, en eV puis en J.
4. Une cellule photovoltaïque carrée de 10 cm de côté reçoit un éclairage de $1\,000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ et fournit une puissance électrique de $2,0 \text{ W}$. Calculer son rendement.
5. Un atome possède les niveaux d'énergie $E_1 = -5,0 \text{ eV}$ (état fondamental), $E_2 = -3,0 \text{ eV}$ et $E_3 = -1,6 \text{ eV}$.
a) Parmi des photons d'énergies $2,0 \text{ eV}$, $2,5 \text{ eV}$, $3,4 \text{ eV}$ et $6,0 \text{ eV}$, lesquels peuvent être absorbés par l'atome dans son état fondamental ? Que se passe-t-il pour le photon de $6,0 \text{ eV}$? b) Calculer les longueurs d'onde des trois raies que l'atome peut émettre en se désexcitant depuis E_3 .

Niveau 2 : type bac

6. Une cellule photoélectrique à cathode de sodium ($W = 2,28 \text{ eV}$) est éclairée par un laser violet de longueur d'onde 400 nm et de puissance $0,50 \text{ mW}$. a) Montrer qu'il y a effet photoélectrique. b) Calculer l'énergie cinétique maximale des électrons émis. c) Calculer le nombre de photons reçus par seconde. d) On admet qu'un photon sur cent arrache un électron collecté par l'anode. Calculer l'intensité du courant. e) Que deviennent le courant et $E_{c,\text{max}}$ si l'on double la puissance du laser ?
7. On éclaire une même cathode métallique par deux radiations. Pour $\lambda_1 = 300 \text{ nm}$, l'énergie cinétique maximale des électrons vaut $1,84 \text{ eV}$; pour $\lambda_2 = 450 \text{ nm}$, elle vaut $0,46 \text{ eV}$. a) Calculer les fréquences ν_1 et ν_2 . b) En utilisant la relation $E_{c,\text{max}} = h \cdot \nu - W$, déterminer h (en $\text{eV}\cdot\text{s}$ puis en $\text{J}\cdot\text{s}$). c) Déterminer le travail d'extraction W et identifier le métal parmi : césium ($1,9 \text{ eV}$), potassium ($2,3 \text{ eV}$), zinc ($4,3$

eV).

8. Une cellule photovoltaïque de surface 25 cm^2 reçoit un éclairement de $800 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. On relève sa caractéristique :

U (V)	0	0,20	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
I (A)	0,60	0,59	0,56	0,52	0,44	0,28	0

a) Donner l'intensité de court-circuit et la tension à vide. b) Calculer la puissance électrique pour chaque point et repérer la puissance maximale. c) Calculer le rendement maximal de la cellule. d) Quelle résistance de charge faut-il brancher pour fonctionner à ce point ?

9. a) Une DEL est fabriquée avec un semi-conducteur de gap $E_g = 1,9 \text{ eV}$. Calculer la longueur d'onde émise et en déduire sa couleur. b) Même question pour un gap de $2,7 \text{ eV}$. c) Une photodiode au silicium ($E_g = 1,12 \text{ eV}$) peut-elle détecter le rayonnement infrarouge d'une télécommande de longueur d'onde 940 nm ? Calculer la longueur d'onde maximale qu'elle détecte. d) Expliquer pourquoi une DEL chauffe beaucoup moins qu'une lampe à incandescence de même éclairement.

Niveau 3 : vers le PASS

10. On éclaire une cathode métallique par une radiation de longueur d'onde 350 nm . Pour empêcher les électrons les plus rapides d'atteindre l'anode, on applique entre la cathode et l'anode une tension qui les freine ; on mesure qu'il faut au minimum une tension $U_0 = 1,20 \text{ V}$. On admet que le travail de la force électrique freinant un électron sous la tension U_0 vaut $-e\cdot U_0$. a) Par le théorème de l'énergie cinétique, montrer que $E_{c,\text{max}} = e\cdot U_0$ et calculer $E_{c,\text{max}}$ en eV. b) En déduire le travail d'extraction du métal. c) Calculer sa longueur d'onde seuil. d) Que devient U_0 si l'on éclaire avec une radiation de 300 nm ?

11. Pour chaque affirmation, dire si elle est vraie ou fausse en justifiant. a) Une lumière rouge très intense peut arracher des électrons à du zinc. b) Doubler la fréquence de la lumière double l'énergie cinétique maximale des électrons émis. c) La pente de la droite $E_{c,\text{max}} = f(\nu)$ est la même pour tous les métaux. d) Un atome d'hydrogène dans l'état fondamental ($E_1 = -13,6 \text{ eV}$, $E_2 = -3,40 \text{ eV}$) absorbe un photon de $10,0 \text{ eV}$. e) Un photon de $15,0 \text{ eV}$ peut ioniser un atome d'hydrogène dans l'état fondamental.

12. En radiographie, on injecte un produit de contraste iodé. L'énergie de liaison d'un électron de la couche K de l'iode vaut $33,2 \text{ keV}$, celle d'un électron de la couche L vaut $4,6 \text{ keV}$. a) Un photon X de $60,0 \text{ keV}$ éjecte un électron K de l'iode par effet photoélectrique. Calculer l'énergie cinétique de l'électron éjecté. b) Calculer la longueur d'onde de ce photon. c) La lacune de la couche K est comblée par un électron de la couche L. Calculer l'énergie du photon émis. d) Un photon de $30,0 \text{ keV}$ peut-il éjecter un électron K de l'iode ? Expliquer pourquoi l'absorption par l'iode augmente brusquement au-dessus de $33,2 \text{ keV}$.

13. Le Soleil fournit au sol un éclairement d'environ $1\,000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. On assimile ce rayonnement à des photons de longueur d'onde moyenne 550 nm . a) Calculer le nombre de photons reçus par seconde sur $1,0 \text{ m}^2$. b) Une cellule au silicium ($E_g = 1,12 \text{ eV}$) absorbe-t-elle un photon de 550 nm ? un photon de $1\,300 \text{ nm}$? c) Un photon de 550 nm absorbé crée une paire électron-trou ; l'énergie utilisable de cette paire vaut au plus E_g . Quelle fraction maximale de l'énergie du photon est récupérée ? d) En déduire deux raisons pour lesquelles le rendement d'une cellule au silicium reste limité.

Corrigés

$$1. E = h \cdot c / \lambda = 6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8 / 250 \times 10^{-9} = 1,99 \times 10^{-25} / 2,50 \times 10^{-7} = 7,96 \times 10^{-19} \text{ J.}$$

$$\text{En eV : } 7,96 \times 10^{-19} / 1,60 \times 10^{-19} = 4,97 \text{ eV. } E = 7,96 \times 10^{-19} \text{ J} \approx 4,97 \text{ eV.}$$

$$2. a) W = 4,3 \times 1,60 \times 10^{-19} = 6,88 \times 10^{-19} \text{ J. } \lambda_0 = h \cdot c / W = 1,99 \times 10^{-25} / 6,88 \times 10^{-19} = 2,89 \times 10^{-7} \text{ m. } \lambda_0 \approx 289 \text{ nm.}$$

b) La lumière visible a des longueurs d'onde comprises entre 400 et 800 nm, toutes supérieures à λ_0 : ses photons sont trop peu énergétiques. **Aucun électron n'est émis**, quelle que soit l'intensité.

$$3. E = 1,99 \times 10^{-25} / 200 \times 10^{-9} = 9,95 \times 10^{-19} \text{ J} = 9,95 / 1,60 = 6,22 \text{ eV.}$$

$$E_{c,\max} = E - W = 6,22 - 4,7 = 1,5 \text{ eV, soit } 1,52 \times 1,60 \times 10^{-19} = 2,4 \times 10^{-19} \text{ J. } E_{c,\max} \approx 1,5 \text{ eV} \approx 2,4 \times 10^{-19} \text{ J.}$$

$$4. S = 0,10 \times 0,10 = 1,0 \times 10^{-2} \text{ m}^2. \text{ Plum} = E \cdot S = 1\,000 \times 1,0 \times 10^{-2} = 10 \text{ W.}$$

$$\eta = \text{Pélec} / \text{Plum} = 2,0 / 10 = 0,20. \eta = 20 \text{ \%}.$$

5. a) Depuis E_1 , les absorptions possibles correspondent à $E_2 - E_1 = -3,0 - (-5,0) = 2,0 \text{ eV}$ et à $E_3 - E_1 = -1,6 - (-5,0) = 3,4 \text{ eV}$. **Les photons de 2,0 eV et 3,4 eV sont absorbés** ; celui de 2,5 eV ne correspond à aucun écart, il n'est pas absorbé. Le photon de 6,0 eV dépasse l'énergie d'ionisation (5,0 eV) : **il ionise l'atome**, l'électron libéré emportant $6,0 - 5,0 = 1,0 \text{ eV}$ d'énergie cinétique.

b) Raies issues de E_3 : $E_3 \rightarrow E_1$: $\Delta E = 3,4 \text{ eV} = 5,44 \times 10^{-19} \text{ J}$, $\lambda = 1,99 \times 10^{-25} / 5,44 \times 10^{-19} = 3,66 \times 10^{-7} \text{ m}$, $\lambda \approx 366 \text{ nm}$ (ultraviolet). $E_3 \rightarrow E_2$: $\Delta E = 1,4 \text{ eV} = 2,24 \times 10^{-19} \text{ J}$, $\lambda = 1,99 \times 10^{-25} / 2,24 \times 10^{-19} = 8,88 \times 10^{-7} \text{ m}$, $\lambda \approx 888 \text{ nm}$ (infrarouge). $E_2 \rightarrow E_1$ (après la précédente) : $\Delta E = 2,0 \text{ eV} = 3,20 \times 10^{-19} \text{ J}$, $\lambda = 1,99 \times 10^{-25} / 3,20 \times 10^{-19} = 6,22 \times 10^{-7} \text{ m}$, $\lambda \approx 622 \text{ nm}$ (rouge orangé).

$$6. a) E = 1,99 \times 10^{-25} / 400 \times 10^{-9} = 4,97 \times 10^{-19} \text{ J} = 3,11 \text{ eV} > W = 2,28 \text{ eV} : \text{il y a effet photoélectrique.}$$

b) $E_{c,\max} = 3,11 - 2,28 = 0,83 \text{ eV}$ ($1,3 \times 10^{-19} \text{ J}$). c) $N = P / E = 0,50 \times 10^{-3} / 4,97 \times 10^{-19} = 1,0 \times 10^{15}$ **photons par seconde**. d) Nombre d'électrons par seconde : $1,0 \times 10^{15} / 100 = 1,0 \times 10^{13}$. Chaque électron porte la charge e , donc $I = 1,0 \times 10^{13} \times 1,60 \times 10^{-19} = 1,6 \times 10^{-6} \text{ A}$. $I \approx 1,6 \mu\text{A}$. e) Doubler la puissance double le nombre de photons, donc le nombre d'électrons : **le courant double** ($3,2 \mu\text{A}$). L'énergie de chaque photon est inchangée : **$E_{c,\max}$ reste 0,83 eV**.

$$7. a) \nu_1 = c / \lambda_1 = 3,00 \times 10^8 / 300 \times 10^{-9} = 1,00 \times 10^{15} \text{ Hz} ; \nu_2 = 3,00 \times 10^8 / 450 \times 10^{-9} = 6,67 \times 10^{14} \text{ Hz.}$$

b) Par différence : $E_{c,1} - E_{c,2} = h(\nu_1 - \nu_2)$, donc $h = (1,84 - 0,46) / (1,00 \times 10^{15} - 6,67 \times 10^{14}) = 1,38 / 3,33 \times 10^{14} = 4,14 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$. En J·s : $4,14 \times 10^{-15} \times 1,60 \times 10^{-19} = 6,6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$. c) $W = h \cdot \nu_1 - E_{c,1} = 4,14 \times 10^{-15} \times 1,00 \times 10^{15} - 1,84 = 4,14 - 1,84 = 2,30 \text{ eV} : \text{le métal est le potassium.}$

$$8. a) I_{cc} = 0,60 \text{ A (pour } U = 0) ; U_0 = 0,60 \text{ V (pour } I = 0).$$

b) $P = U \cdot I$: 0 ; $0,20 \times 0,59 = 0,118 \text{ W}$; $0,40 \times 0,56 = 0,224 \text{ W}$; $0,45 \times 0,52 = 0,234 \text{ W}$; $0,50 \times 0,44 = 0,220 \text{ W}$; $0,55 \times 0,28 = 0,154 \text{ W}$; 0. **$P_{\max} \approx 0,234 \text{ W}$, pour $U = 0,45 \text{ V}$ et $I = 0,52 \text{ A}$.** c) $S = 25 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 2,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2$. $\text{Plum} = 800 \times 2,5 \times 10^{-3} = 2,0 \text{ W}$. $\eta = 0,234 / 2,0 = 0,117$. $\eta \approx 12 \text{ \%}$. d) $R = U / I = 0,45 / 0,52 = 0,87 \Omega$.

$$9. a) E_g = 1,9 \times 1,60 \times 10^{-19} = 3,04 \times 10^{-19} \text{ J} ; \lambda = h \cdot c / E_g = 1,99 \times 10^{-25} / 3,04 \times 10^{-19} = 6,5 \times 10^{-7} \text{ m. } \lambda \approx 650 \text{ nm : DEL rouge.}$$

b) $E_g = 2,7 \times 1,60 \times 10^{-19} = 4,32 \times 10^{-19} \text{ J} ; \lambda = 1,99 \times 10^{-25} / 4,32 \times 10^{-19} = 4,6 \times 10^{-7} \text{ m. } \lambda \approx 460 \text{ nm : DEL bleue.}$ c) $\lambda_{\max} = h \cdot c / E_g = 1,99 \times 10^{-25} / (1,12 \times 1,60 \times 10^{-19}) = 1,99 \times 10^{-25} / 1,79 \times 10^{-19} = 1,11 \times 10^{-6} \text{ m. } \lambda_{\max} \approx 1\,110 \text{ nm} ; 940 \text{ nm} < 1\,110 \text{ nm}$, donc le photon a une énergie supérieure à E_g : **la photodiode détecte le signal de la télécommande**. d) Dans la DEL, l'énergie électrique est convertie directement en

photons de la couleur voulue lors des recombinaisons. Une lampe à incandescence produit de la lumière en chauffant un filament, et l'essentiel de l'énergie est rayonné dans l'infrarouge ou dissipé thermiquement. **À éclairage égal, la DEL consomme moins d'énergie et en perd beaucoup moins en chaleur.**

10. a) Système : l'électron le plus rapide, de la cathode jusqu'à l'arrêt juste devant l'anode. Théorème de l'énergie cinétique : $0 - E_{c,max} = -e \cdot U_0$ (le poids est négligeable). Donc $E_{c,max} = e \cdot U_0$. Pour $U_0 = 1,20 \text{ V}$, $E_{c,max} = 1,20 \text{ eV}$ (par définition de l'électronvolt), soit $1,92 \times 10^{-19} \text{ J}$.

b) $E = 1,99 \times 10^{-25} / 350 \times 10^{-9} = 5,68 \times 10^{-19} \text{ J} = 3,55 \text{ eV}$. $W = E - E_{c,max} = 3,55 - 1,20 = 2,35 \text{ eV}$. c) $\lambda_0 = h \cdot c / W = 1,99 \times 10^{-25} / (2,35 \times 1,60 \times 10^{-19}) = 1,99 \times 10^{-25} / 3,76 \times 10^{-19} = 5,29 \times 10^{-7} \text{ m}$. $\lambda_0 \approx 529 \text{ nm}$. d) À 300 nm : $E = 1,99 \times 10^{-25} / 3,00 \times 10^{-7} = 6,63 \times 10^{-19} \text{ J} = 4,14 \text{ eV}$; $E_{c,max} = 4,14 - 2,35 = 1,79 \text{ eV}$. $U_0 = 1,79 \text{ V}$: la tension d'arrêt augmente avec la fréquence.

11. a) **Faux** : un photon rouge (environ $1,8 \text{ eV}$) a une énergie inférieure au travail d'extraction du zinc ($4,3 \text{ eV}$) ; l'intensité augmente le nombre de photons, pas leur énergie individuelle.

b) **Faux** : $E_{c,max} = h \cdot \nu - W$ n'est pas proportionnelle à ν . Doubler ν fait passer $E_{c,max}$ de $h \cdot \nu - W$ à $2h \cdot \nu - W$, qui est plus que le double. c) **Vrai** : la pente vaut h , constante universelle ; seule l'abscisse à l'origine (ν_0) dépend du métal. d) **Faux** : $E_2 - E_1 = -3,40 - (-13,6) = 10,2 \text{ eV} \neq 10,0 \text{ eV}$, et $10,0 \text{ eV}$ est inférieur à l'énergie d'ionisation : le photon n'est pas absorbé. e) **Vrai** : l'énergie d'ionisation depuis l'état fondamental vaut $13,6 \text{ eV} < 15,0 \text{ eV}$; l'électron est libéré avec $15,0 - 13,6 = 1,4 \text{ eV}$ d'énergie cinétique.

12. a) $E_c = E_{\text{photon}} - E_{\text{liaison}} = 60,0 - 33,2 = 26,8 \text{ keV}$.

b) $E = 60,0 \times 10^3 \times 1,60 \times 10^{-19} = 9,60 \times 10^{-15} \text{ J}$. $\lambda = h \cdot c / E = 1,99 \times 10^{-25} / 9,60 \times 10^{-15} = 2,07 \times 10^{-11} \text{ m}$. $\lambda \approx 2,1 \times 10^{-11} \text{ m} = 20,7 \text{ pm}$. c) L'électron passe d'un niveau d'énergie $-4,6 \text{ keV}$ à un niveau $-33,2 \text{ keV}$; le photon emporte la différence : $33,2 - 4,6 = 28,6 \text{ keV}$ (photon X de fluorescence). d) $30,0 \text{ keV} < 33,2 \text{ keV}$: **ce photon ne peut pas éjecter un électron K**, il ne peut interagir qu'avec des électrons moins liés.

Au-dessus de $33,2 \text{ keV}$, les électrons K, les plus proches du noyau, deviennent accessibles et l'absorption par effet photoélectrique augmente brusquement : c'est ce qui rend l'iode très absorbant pour les photons utilisés en radiographie et explique son emploi comme produit de contraste.

13. a) $E = h \cdot c / \lambda = 1,99 \times 10^{-25} / 550 \times 10^{-9} = 3,62 \times 10^{-19} \text{ J}$. $N = P / E = 1\,000 / 3,62 \times 10^{-19} = 2,8 \times 10^{21}$ **photons par seconde sur $1,0 \text{ m}^2$** .

b) Photon de 550 nm : $3,62 \times 10^{-19} / 1,60 \times 10^{-19} = 2,26 \text{ eV} > 1,12 \text{ eV}$, **il est absorbé**. Photon de $1\,300 \text{ nm}$: $E = 1,99 \times 10^{-25} / 1,30 \times 10^{-6} = 1,53 \times 10^{-19} \text{ J} = 0,96 \text{ eV} < 1,12 \text{ eV}$, **il n'est pas absorbé** (il traverse le silicium). c) Fraction maximale récupérée : $E_g / E = 1,12 / 2,26 = 0,50$. **Au plus 50 % de l'énergie du photon**, le reste est perdu en chaleur. d) **Première raison** : les photons d'énergie inférieure à E_g (infrarouge au-delà de $1,1 \mu\text{m}$) ne sont pas absorbés. **Deuxième raison** : pour les photons absorbés, l'excédent d'énergie au-dessus de E_g est perdu sous forme thermique. S'y ajoutent les pertes par réflexion et les recombinaisons de paires avant leur collecte.