

Exercices

Corrigé de l'exercice 1 — Le pointeur laser

1. $E = hc/\lambda = 6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8 / (650 \times 10^{-9}) = 3,1 \times 10^{-19} \text{ J} = 1,9 \text{ eV}$.
2. $N = P/E = 1,0 \times 10^{-3} / 3,1 \times 10^{-19} = 3,3 \times 10^{15}$ photons par seconde.
3. Trois millions de milliards par seconde pour un simple pointeur : le flux est si dense que la lumière paraît continue — la granularité est indétectable à notre échelle (voir le problème de Fermi).

Corrigé de l'exercice 2 — Le seuil du titane

1. $\nu_0 = \varphi/h = 4,33 \times 1,60 \times 10^{-19} / 6,63 \times 10^{-34} = 1,04 \times 10^{15} \text{ Hz}$, soit $\lambda_0 = c/\nu_0 = 2,87 \times 10^{-7} \text{ m} = 287 \text{ nm}$: ultraviolet.
2. $\lambda = 450 \text{ nm} > \lambda_0$ (soit $E = hc/\lambda = 2,8 \text{ eV} < \varphi$) : **aucune** extraction, quelle que soit l'intensité — chaque photon bleu est trop faible.
3. $\lambda = 250 \text{ nm} < \lambda_0$: extraction ; $E = hc/\lambda = 4,97 \text{ eV}$ et $E_c = E - \varphi = 4,97 - 4,33 = 0,64 \text{ eV}$.

Corrigé de l'exercice 3 — Vrai ou faux : l'intensité et la fréquence

1. **Faux** : sous le seuil, chaque photon est individuellement trop faible ; en ajouter ne change rien ($E_c = h\nu - \varphi$ ne dépend pas de l'intensité).
2. **Faux** : doubler l'intensité double le nombre de photons, pas leur énergie — E_c est inchangée.
3. **Vrai** : deux fois plus de photons, deux fois plus d'électrons extraits, courant doublé.
4. **Vrai** : $E_c = h\nu - \varphi$ croît avec ν (chaque photon est plus énergétique).

Corrigé de l'exercice 4 — La cellule au potassium

1. $E_1 = hc/\lambda_1 = 4,74 \times 10^{-19} \text{ J} = 2,96 \text{ eV}$; $E_2 = hc/\lambda_2 = 3,26 \times 10^{-19} \text{ J} = 2,04 \text{ eV}$.
2. Seule la radiation à 420 nm dépasse $\varphi = 2,3 \text{ eV}$: elle seule extrait des électrons ($2,04 < 2,3$: la seconde est impuissante).
3. $E_c = 2,96 - 2,3 = 0,66 \text{ eV} = 1,1 \times 10^{-19} \text{ J}$; la vitesse s'en déduit :

$$v = \sqrt{\frac{2E_c}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \times 1,06 \times 10^{-19}}{9,11 \times 10^{-31}}} = 4,8 \times 10^5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

— cinq cents kilomètres par seconde, sans être relativiste ($v/c \sim 10^{-3}$).

Corrigé de l'exercice 5 — Le rendement quantique

1. $E_{\text{photon}} = hc/\lambda = 3,6 \times 10^{-19} \text{ J}$, d'où $N_{\text{ph}} = P/E_{\text{photon}} = 2,0 \times 10^{-3} / 3,6 \times 10^{-19} = 5,6 \times 10^{15}$ photons par seconde.
2. $N_e = I/e = 90 \times 10^{-6} / 1,60 \times 10^{-19} = 5,6 \times 10^{14}$ électrons par seconde.
3. $N_e/N_{\text{ph}} = 0,10$: un photon sur dix aboutit. Les autres sont réfléchis, absorbés sans extraction (énergie dissipée en chaleur) ou libèrent des électrons recapturés en chemin.

Corrigé — Exercice d'approfondissement — L'œil, compteur de photons

1. La puissance s'étale sur la sphère de rayon $d = 100 \times 9,5 \times 10^{15} = 9,5 \times 10^{17} \text{ m}$:
$$I = \frac{P}{4\pi d^2} = \frac{3,8 \times 10^{26}}{4\pi \times (9,5 \times 10^{17})^2} = 3,4 \times 10^{-11} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}.$$
2. La pupille offre $S = \pi r^2 = \pi \times (3,0 \times 10^{-3})^2 = 2,8 \times 10^{-5} \text{ m}^2$, d'où $P_{\text{œil}} = I \cdot S = 9,5 \times 10^{-16} \text{ W}$.
3. $N = P_{\text{œil}}/E_{\text{photon}} = 9,5 \times 10^{-16} / 4,0 \times 10^{-19} = 2,4 \times 10^3$ photons par seconde — une étoile « à peine visible » mitraille encore l'œil de plus de deux mille photons par seconde.
4. N décroît comme $1/d^2$: pour diviser N par $2,4 \times 10^3$, multiplier d par $\sqrt{2,4 \times 10^3} = 49$, soit $d' \simeq 4,9 \times 10^3 \text{ a.l.}$ À cette distance, l'étoile n'envoie plus un flux continu à l'échelle de l'œil : elle envoie des photons **un par un**. Seuls les capteurs capables de compter ces photons, comme les caméras des grands télescopes, peuvent encore la détecter.

Corrigé — Exercice de réflexion — L'argument fatal

Pour une onde, l'énergie arrive **en continu** : elle s'accumule proportionnellement à l'intensité et à la durée. Une lumière rouge intense devrait donc, tôt ou tard, réunir de quoi arracher un électron — or rien ne sort jamais ; et une lueur violette famélique devrait exiger une longue accumulation — or l'électron jaillit sans délai. Les deux observations contredisent frontalement l'accumulation continue. Si au contraire l'énergie arrive par **grains** absorbés un à un, tout s'inverse : le grain rouge ($h\nu < \varphi$) est individuellement trop pauvre, en multiplier le nombre n'y change rien ; le grain violet ($h\nu > \varphi$) suffit à lui seul, et le **premier arrivé** fait l'affaire — d'où l'immédiateté. Les deux anomalies deviennent deux évidences.

Corrigé — Problème de Fermi — Une lampe émet-elle beaucoup de photons ?

Ordres de grandeur choisis : une ampoule domestique rayonne environ 5 W de lumière visible ; un photon visible porte $\sim 4 \times 10^{-19} \text{ J}$. À $d \sim 50 \text{ cm}$, supposons l'émission répartie dans toutes les directions : l'intensité lumineuse reçue vaut

$$I \sim \frac{5}{4\pi d^2} \sim 2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}.$$

Une page de surface $S \sim 500 \text{ cm}^2 = 5 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ reçoit alors une puissance de l'ordre de $P_{\text{page}} \sim IS \sim 10^{-1} \text{ W}$, soit

$$N \sim \frac{10^{-1}}{4 \times 10^{-19}} \sim 3 \times 10^{17} \text{ photons par seconde.}$$

Même une seule page reçoit des centaines de millions de milliards de photons par seconde : la granularité est réelle, mais noyée sous le nombre. Il a fallu l'effet photo-électrique pour la débusquer.

E.C.E. — Exploitation

1. $P_{\text{reçue}} = 8,0 \times 10^2 \times (0,100 \times 0,050) = 4,0 \text{ W}$.
2. $P = U \cdot I$ (en W) : 0 ; 0,25 ; 0,48 ; 0,58 ; **0,59** ; 0,54 ; 0,39 ; 0,14 ; 0 — maximum $P_{\text{élec}} = 0,59 \text{ W}$ au point (5,5 V ; 108 mA).
3. $\eta = P_{\text{élec}}/P_{\text{reçue}} = 0,59/4,0 = 15 \%$ (avec $u(\eta) = 1$ point).
4. On prend aussi $u(\eta_{\text{constr}}) = 1$ point pour la valeur constructeur. Écart normalisé : $z = |15 - 17|/\sqrt{1^2 + 1^2} = 1,4 < 2$: compatible avec l'annonce. Le rendement reste loin de 100 % car (entre autres) : les photons de $h\nu$ inférieur au seuil du semi-conducteur ne sont pas convertis (tout l'infrarouge lointain) ; et pour les photons convertis, l'énergie reçue au-delà de ce qui est utile est dissipée en chaleur — sans compter la réflexion sur la surface.

Programmation Python

1. La pente est en eV/Hz : la passer en J·s revient à convertir des eV en joules, $h_{\text{exp}} = \text{pente} \cdot e$ — le script affiche $h_{\text{exp}} = 6,61 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, à 0,3 % de la valeur admise.
2. L'ordonnée à l'origine de la droite $E_c = h\nu - \varphi$ est $-\varphi$: donc $\phi = -\text{ordonnee}$, qui affiche 2,27 eV — le travail d'extraction du sodium (2,3 eV).
3. Mesurer la pente d'une droite expérimentale, c'est mesurer une **constante fondamentale de la nature** avec du sodium et des lampes. Millikan, parti pour réfuter Einstein, produisit la meilleure mesure de h de son époque — et une confirmation éclatante de la théorie qu'il combattait : le prix Nobel (1923) salua l'expérimentateur irréprochable.