

Chapitre 23 : L'effet photoélectrique.



01 Électroscope et baguette de verre - sans contact
02 Effet photoélectrique décharge d'un électroscope
(jusqu'à 4min08)



I. L'effet photoélectrique : Description du phénomène:

On éclaire un métal avec de la lumière (visible, UV ou IR), on constate que certaines radiations peuvent extraire des électrons du métal et d'autres n'y parviennent pas .

Ce phénomène était connu au XIX^{ème} siècle mais c'est Albert Einstein qui - en 1905 - l'interprètera correctement, il obtint le prix Nobel pour cela.

Einstein introduit deux nouveautés dans son raisonnement:

- Pour interpréter cette expérience, il ne faut pas considérer la **lumière** comme une onde mais comme une **émission de grains de matière de masse nulle, que l'on appelle photon : modèle particulaire** de la lumière (par opposition au modèle **ondulatoire** de la lumière).

- En 1900, Max Planck explique que la variation d'énergie d'un atome qui diffuse une radiation vaut $h \cdot \nu$ (h est une constante et ν est la fréquence de la lumière émise), Einstein postule que **l'énergie de chaque photon vaut $h \cdot \nu$.**

$$E_{\text{photon}} = h \cdot \nu$$

$$E_{\text{photon}} = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

$$E_{\text{photon}} \text{ en J}$$
$$\nu \text{ en Hz} \quad c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$
$$\lambda \text{ en m}$$

II. L'effet photoélectrique: Aspect énergétique :

1. Etude d'un cas «similaire» en mécanique : Le «carreau» en pétanque :



boule A boule B



boule A boule B

boule A boule B

Schéma pour l'étude :



Etat initial : boule A \rightarrow vitesse V_A , boule B \rightarrow immobile

Etat final : boule A \rightarrow immobile , boule B \rightarrow vitesse V_B

Système { boule A et boule B }

BF: \vec{P}_A , \vec{P}_B , \vec{R}_{NA} et \vec{R}_{NB} .

$$\Delta E_{m_{A+B}} = \Sigma W(\vec{F}_{ext})$$

Entre l'état initial et l'état final, aucune force ne se déplace donc

$$\Sigma W(\vec{F}_{ext}) = 0$$

$$\Delta E_{m_{A+B}} = 0$$

$$\Delta E_{m_A} + \Delta E_{m_B} = 0$$

$$(E_{m_{A_final}} - E_{m_{A_initial}}) + (E_{m_{B_final}} - E_{m_{B_initial}}) = 0$$

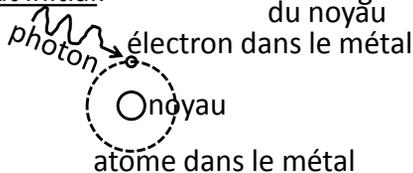
$$(0 - E_{m_{A_initial}}) + (E_{m_{B_final}} - 0) = 0$$

$$E_{m_{A_initial}} = E_{m_{B_final}}$$

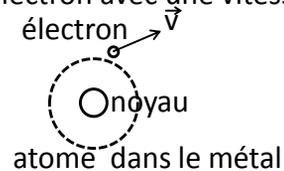
Conclusion : L'énergie de la boule A a été intégralement transmise à la boule B, on dit que **l'énergie se conserve au cours d'un choc**.

2. Cas de l'effet photoélectrique :

État initial: électron au voisinage du noyau
électron dans le métal



État final: photon absorbé par le métal,
éjection de l'électron avec une vitesse v .



Il s'agit d'un choc entre un photon et un électron or l'énergie se conserve au cours d'un choc donc le photon transmet son énergie à l'électron:

$$E_{\text{photon}} = E_{\text{électron}}$$

L'électron est lié au métal, son extraction nécessite de l'énergie donc le transfert d'énergie du photon se fait de la façon suivante :

L'énergie du photon permet :

- premièrement : de «détacher» l'électron du métal, on **note W_{ex} , le travail minimum à fournir à l'électron pour extraire l'électron du métal**.
- deuxièmement : de transmettre de l'énergie cinétique à l'électron.

donc

$$E_{\text{photon}} = W_{ex} + E_{c\text{électron}}$$

III. Bilan énergétique : vérification expérimentale.

1. Le graphe $E_{c\text{électron}} = f(\nu)$:

$$E_{\text{photon}} = E_{c\text{électron}} + W_{\text{ex}}$$

$$h \cdot \nu = E_{c\text{électron}} + W_{\text{ex}}$$

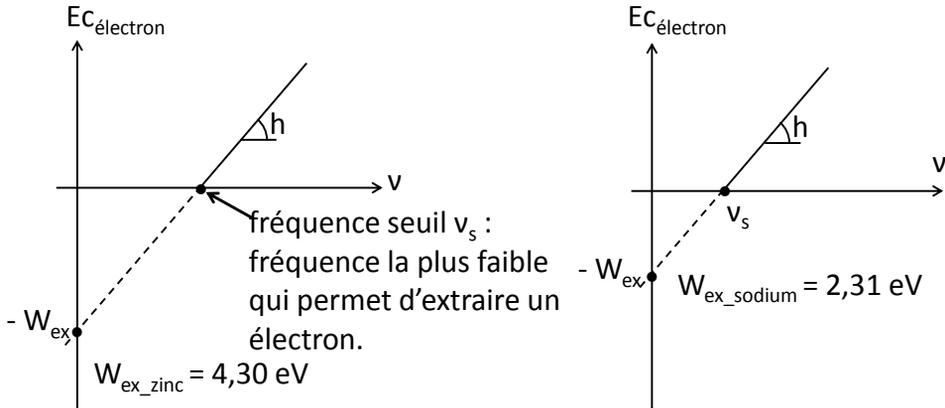
$$E_{c\text{électron}} = h \cdot \nu - W_{\text{ex}}$$

La valeur du travail d'extraction dépend de la nature du matériau:

$$W_{\text{ex_zinc}} = 4,30 \text{ eV}$$

$$(1 \text{ eV} = 1,90 \cdot 10^{-19} \text{ J})$$

$$W_{\text{ex_sodium}} = 2,31 \text{ eV}$$



2. Recherche du type de radiations pouvant éjecter des électrons d'un métal:

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s} \quad 1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Cas du zinc : $W_{s_zinc} = 4,30 \text{ eV} \quad E_{c\text{électron}} = h \cdot \nu - W_{\text{ex}}$

• recherche de la valeur de ν_{ex} : $0 = h \cdot \nu_{\text{ex}} - W_{\text{ex}}$

$$\nu_s = \frac{W_{\text{ex}}}{h} = \frac{4,30 \times 1,6 \cdot 10^{-19}}{6,63 \cdot 10^{-34}} = 1,04 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

• recherche de la longueur d'onde λ_s :

$$\lambda_s = \frac{c}{\nu_{\text{ex}}} = \frac{3,00 \cdot 10^8}{1,04 \cdot 10^{15}} = 2,89 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 289 \text{ nm} \rightarrow \text{UV}$$

Rq : pour la radiation 289 nm, l'électron est extrait mais sa vitesse est nulle ($E_c = 0 \text{ J}$).

Pour obtenir $E_c \neq 0$, il faut que $E_c \nearrow$

- donc $\nu \nearrow$ ($E_{c\text{électron}} = h \cdot \nu - W_{\text{ex}}$)

- donc $\lambda \searrow$ ($\lambda = \frac{c}{\nu}$).

Vérification avec Animation
Photoelectric effect

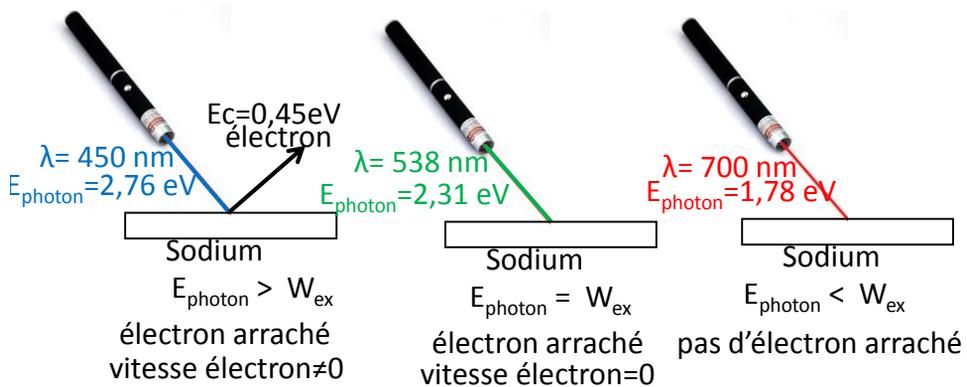
Résumé :

Pour le métal sodium : $W_{\text{ex}} = 2,31 \text{ eV}$ et $\lambda_s = 538 \text{ nm}$

Énergie d'un photon dont la radiation lumineuse vaut 450 nm:

$$E_{\text{photon}} = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \times 3,00 \cdot 10^8}{450 \cdot 10^{-9}} = 4,42 \cdot 10^{-19} \text{ J} = \frac{4,42 \cdot 10^{-19}}{1,60 \cdot 10^{-19}} = 2,76 \text{ eV}$$

$$E_{\text{photon}} = E_{\text{c'électron}} + W_{\text{ex}}$$

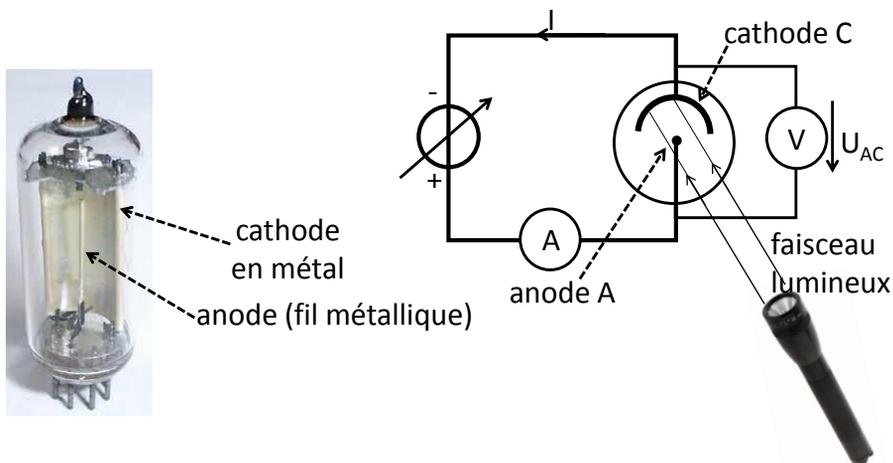


IV. La cellule photoélectrique :

1. Dispositif :



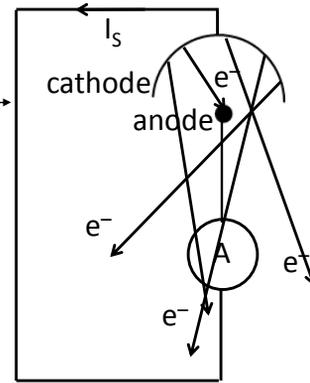
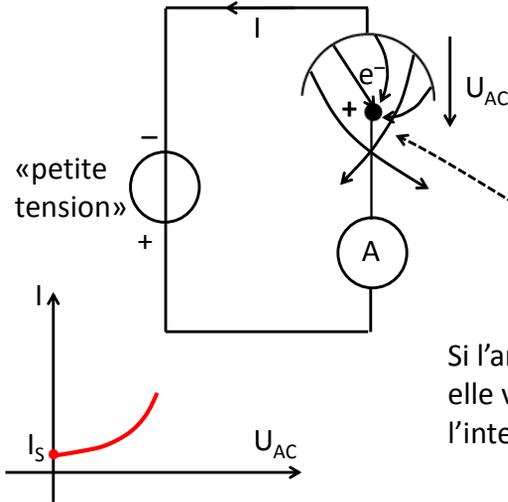
Effet photoélectrique polarisation cellule
Vidéo : 0 à 20 s puis 4min54s → fin



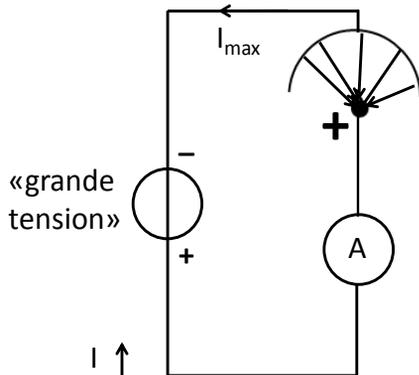
2. Fonctionnement :

Si les radiations sont assez énergétiques, des électrons sont éjectés de la cathode.

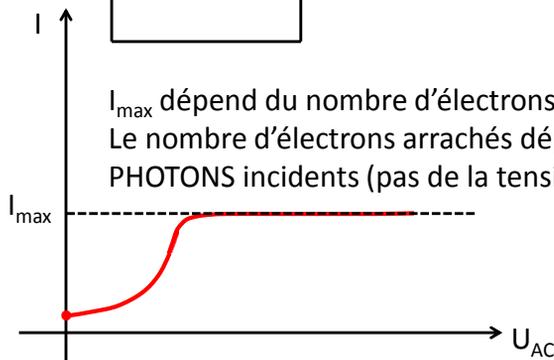
Certains d'entre eux atteignent l'anode: un petit courant électrique circule alors, noté I_s .



Si l'anode est chargée positivement, elle va attirer davantage d'électrons et l'intensité du courant va augmenter.

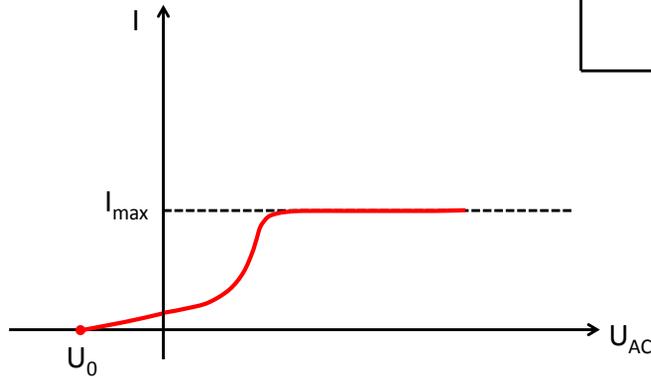
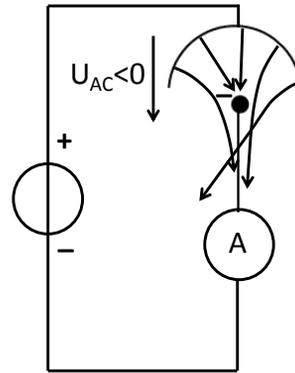


Si le potentiel de l'anode est suffisamment positif (tension élevée), l'anode pourra alors attirer vers elle TOUS les électrons éjectés, l'intensité I du courant sera alors MAXIMALE.



I_{max} dépend du nombre d'électrons arrachés sur le métal.
Le nombre d'électrons arrachés dépend du nombre de PHOTONS incidents (pas de la tension).

Les électrons sont repoussés par l'anode (chargée -).
 Pour une certaine tension notée U_0 , aucun ne pénètre dans l'anode, ils s'ARRÊTENT devant celle-ci ou sont déviés donc $I=0A$.



3. Intérêt du dispositif :

a. Puissance lumineuse P et puissance surfacique Ps :

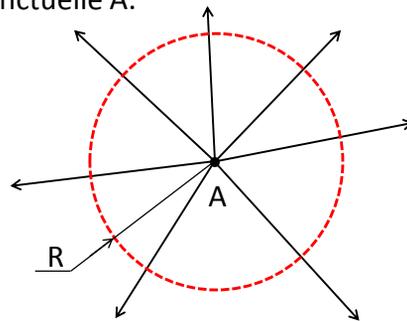
On considère une source lumineuse ponctuelle A.

La puissance P_1 de la source est :

$$P_1 = \frac{E_1}{\Delta t} = \frac{N_1 \cdot E_{\text{photon}}}{\Delta t} = \frac{N_1 \cdot h \cdot \nu}{\Delta t}$$

E_1 : énergie en J

N_1 : nombre de photons émis.



On considère une sphère (fictive) de rayon R autour de la source A.

La puissance surfacique P_{S_1} est : $P_{S_1} = \frac{P_1}{S_1}$

S_1 : aire de la sphère en m^2 : $S_1 = 4 \cdot \pi \cdot R^2$

b. Puissance lumineuse P' reçue à la cathode :

On place la cathode de surface S' sur la sphère .

La sphère et la cathode reçoivent le même nombre de photons PAR M^2 donc les puissances surfaciques sont égales :

$$P_{S1} = \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_1'}{S'}$$

P_1' est la puissance de la lumière reçue par la cathode.

c. Puissance lumineuse P' et intensité du courant I_{\max} :

Le faisceau de lumière de puissance P_1' engendre un courant $I_{\max1}$.

On utilise maintenant une source de lumière 2 fois plus puissance :

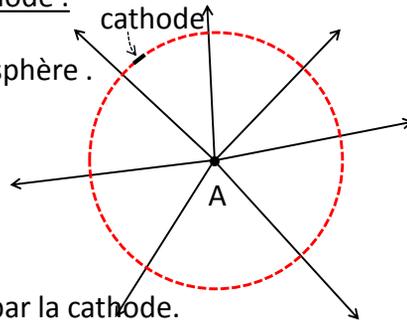
→ 2 fois plus de photons émis

→ $P_2 = 2 \times P_1$

→ $P_{S2} = 2 \times P_{S1}$

→ $P_2' = 2 \times P_1'$

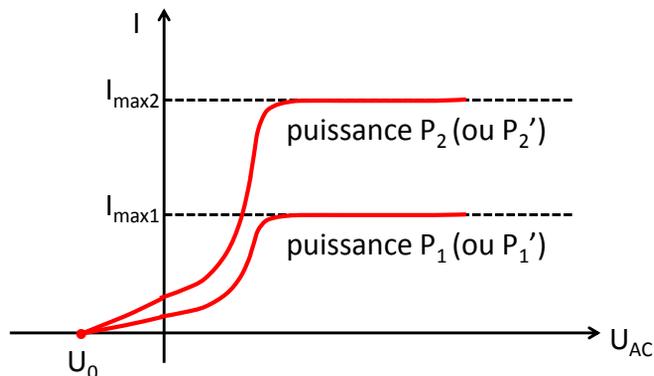
→ $I_{\max2} = 2 \times I_{\max1}$



c. Conclusion : P' est proportionnelle à I_{\max} .

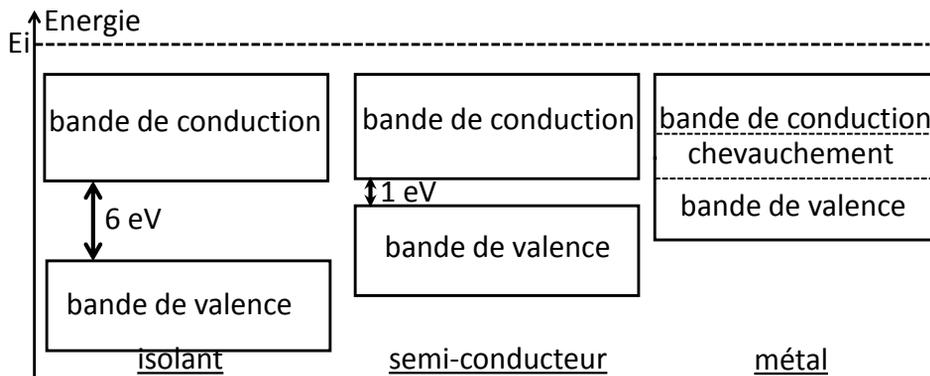
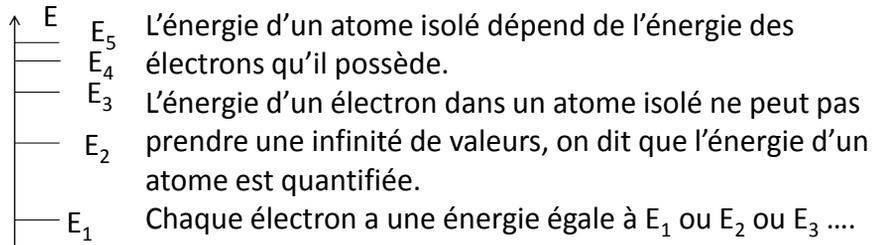
La puissance de la lumière utilisée est proportionnelle à l'intensité I_{\max} produite par la cellule photoélectrique.

Une cellule photoélectrique est un dispositif permettant de réaliser des mesures de puissances lumineuses : photométrie.



V. Capteurs utilisant l'interaction photon-matière:

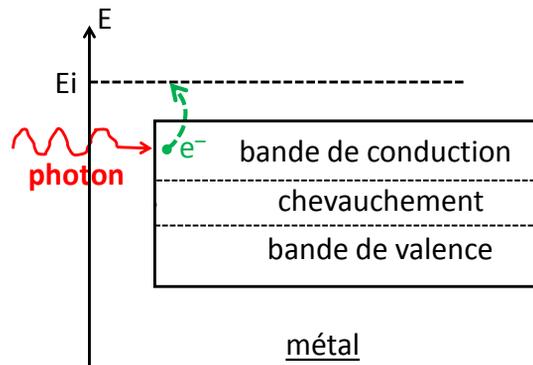
1. Énergie d'un atome isolé (gaz) puis dans un solide :



Dans un solide (isolant, conducteur, métal), l'énergie d'un électron appartient à des intervalles nommés bande de valence et bande de conduction:

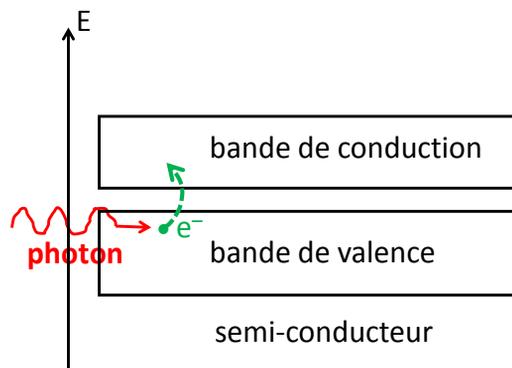
- l'électron est libre de se mouvoir sur la surface du solide si son énergie appartient à la bande de conduction.
- l'électron reste dans l'atome si son énergie appartient à la bande de valence.
- L'électron quitte le solide (ionisation) si son énergie est égale à l'énergie de ionisation E_i .

2. La cellule photoélectrique :



Un photon frappe un électron qui possède alors suffisamment d'énergie pour quitter le métal (énergie de ionisation).

3. La cellule photovoltaïque, la photopile, la photodiode :



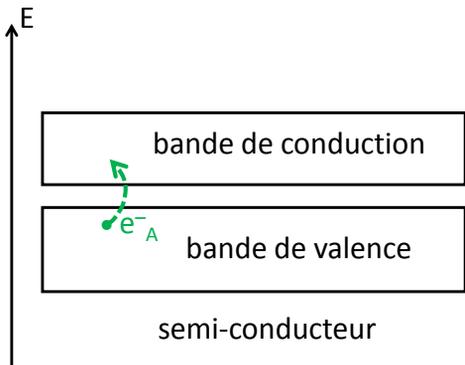
Un photon frappe un électron qui possède alors suffisamment d'énergie pour se déplacer librement à travers le circuit électrique.

L'électron traverse le circuit.

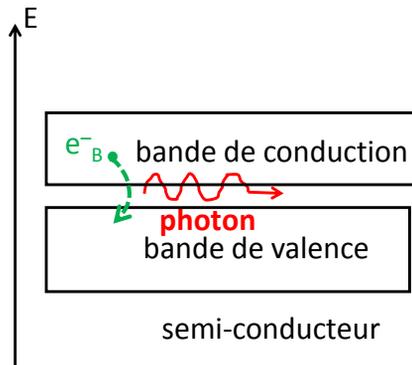
Il reprend sa place dans la bande de valence (perte d'énergie en traversant le circuit).

Un autre photon le frappe, le phénomène recommence.

4. La diode électroluminescente (DEL ou LED) :



Un champ électrique (générateur) fournit de l'énergie à un électron A de la bande de valence, il passe dans la bande de conduction et se déplace. Un autre électron (B) de conduction prend la place de l'électron A dans l'atome étudié.



Pour cet atome, cet état est très instable donc l'électron B passe dans la bande de valence (état plus stable). Il perd alors de l'énergie donc un photon est émis (conservation de l'énergie).