



COURS 16

« La lumière : un flux de photons mais pas que ! »

Les compétences à acquérir...

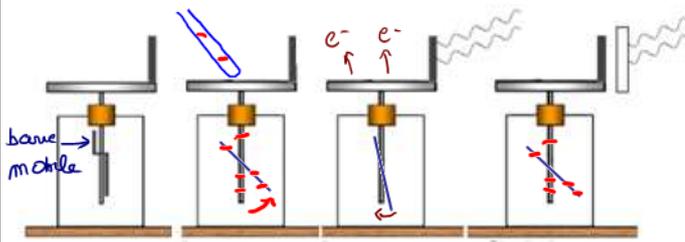
- Décrire l'effet photoélectrique, ses caractéristiques et son importance historique.
- Interpréter qualitativement l'effet photoélectrique à l'aide du modèle particulaire de la lumière.
- Le photon : énergie, vitesse, masse.
- Établir, par un bilan d'énergie, la relation entre l'énergie cinétique des électrons et la fréquence.
- Expliquer qualitativement le fonctionnement d'une cellule photoélectrique.
- Absorption et émission de photons.
- Enjeux énergétiques : rendement d'une cellule photovoltaïque.



I- Une expérience historique : L'effet photoélectrique

1- Expérience mettant en évidence de l'effet électrique :

Une plaque de zinc, montée sur un électroscope, est éclairée dans un premier temps par une lampe UV. Ensuite, une vitre est intercalée en la plaque de verre et la lampe.



Observations :

- Un bâton d'ébonite préalablement frotté, est mis en contact avec l'électroscope... des e^- se déplacent dans l'électroscope... la lame s'écarte
- Une lampe au mercure est projetée sur l'électroscope... la lame revient progressivement à la verticale
- Une vitre est introduite entre l'électroscope et la lampe... les UV ne passent plus, la lame ne bouge pas

Un début d'interprétation :

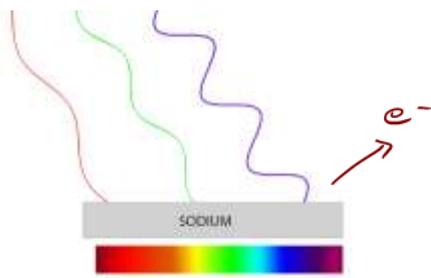
Sous l'action d'ondes électromagnétiques (Ultraviolet), des électrons sont arrachés du métal constituant l'électroscope... il n'y a plus d'électrons en excès donc la lame revient à la position verticale... le UV semble être responsable de ce phénomène

2- Un problème difficile à résoudre !

Entre 1887 et 1900, des scientifiques tels qu'Heinrich Hertz, Wilhem Hallwachs et Julius Elster ont montré que des particules négatives sont arrachées à des plaques constituées de métaux alcalins lorsqu'elles sont soumises à des ondes électromagnétiques dans le visible et les ultraviolets. Ces particules sont des électrons

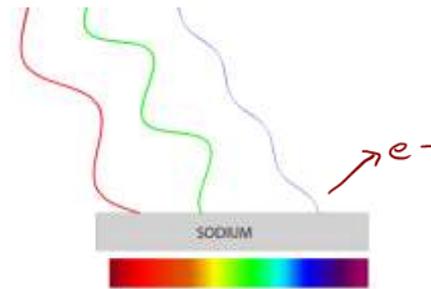
L'interprétation de ce phénomène n'a pas été simple à expliquer à cette époque !

En voici les raisons



- Les OEM correspondant à la couleur rouge et verte ne permettent pas d'arracher les e^- du sodium

- L'OEM correspondant à la couleur bleue permet d'arracher des électrons



- L'énergie des radiations rouges et vertes ne semblent pas être suffisantes pour arracher les électrons du Sodium.

- Augmentons, alors, les intensités des radiations rouges et vertes et baissions l'intensité de la radiation bleue : cela ne change rien

Le modèle ondulatoire de la lumière, qui était le modèle admis à l'époque, ne permet pas d'expliquer ces différentes observations.

Il faudra attendre 1905 ... Albert Einstein postule que la lumière est constituée d'une ensemble de quanta d'énergie et permet d'interpréter ce phénomène. La lumière est de nature corpusculaire : les photons...

Il fut récompensé du prix Nobel de physique en 1921

La lumière est décrite comme des photons... dans leurs interactions avec la matière, et comme des ondes.. pour leur propagation. } Objet Quantique

3- L'effet photo électrique :

a- le photon : un grain de lumière

Photon

- sa masse est *nulle*.....
- sa vitesse est *celle de la lumière : c*
- son énergie est proportionnelle à sa fréquence ν

$$E_{\text{photon}} = h \cdot \nu = h \frac{c}{\lambda} \quad \text{avec } c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \times \nu \quad \text{donc } \nu = \frac{c}{\lambda}$$

avec $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ constante de Planck

Unité : l'électronvolt
 $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

$$\left\{ \begin{aligned} c &= \frac{\lambda}{T} = \lambda \times \frac{1}{T} \\ &\Rightarrow c = \lambda \times \nu \end{aligned} \right.$$

b- Définition de l'effet photoélectrique :

L'effet photoélectrique est le phénomène d'émission *d'électrons d'un métal sous l'action d'ondes électromagnétiques (OEM, lumière)*

- Lorsqu'un métal est exposé à la lumière, il est exposé à un torrent de photons. Ceux-ci entrent en collision avec les électrons et *leurs énergies peuvent être absorbés*.

- Pour que l'électron puisse être éjecté, il doit recevoir une énergie minimale de la part du photon pour quitter le métal.

Cette énergie porte le nom de « travail d'extraction » noté W_{ext} (en J ou eV)

- Si $E_{\text{photon}} < W_{\text{ext}}$ alors *aucun électron n'est émis*
- Si $E_{\text{photon}} > W_{\text{ext}}$ alors, pour un photon *absorbé*, un électron est *émis*

Matériau	$W_{\text{extraction}}$ en (eV)
Carbone	5,0
Sodium	2,70
Silicium	4,8
Cuivre	4,71
Zinc	3,6
Argent	4,3
Or	5,1

c- Fréquence seuil ν_{seuil} :

La fréquence seuil notée ν_{seuil} ou ν_s correspond à la fréquence minimale du photon absorbé pour laquelle il y a émission d'un électron

$$E_{\text{photon}} = h \nu_{\text{seuil}} = W_{\text{ext}} \quad \text{donc } \nu_{\text{seuil}} = \frac{E_{\text{photon}}}{h} \quad \left. \begin{array}{l} \text{J} \\ \text{J} \cdot \text{s} \end{array} \right\} \nu_{\text{seuil}} \text{ en } \frac{1}{\text{s}} \text{ c'est à dire des Hz} \quad \nu = \frac{1}{T}$$

Exercice :

Calculer la fréquence seuil notée aussi ν_s du sodium.

En déduire la longueur d'onde λ de ce photon. Conclure sur l'exemple donné au paragraphe 2

D'après le tableau $W_{\text{ext}}(\text{Na}) = 2,70 \text{ eV}$

ou $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

$\Rightarrow W_{\text{ext}}(\text{Na}) = 2,70 \times 1,60 \cdot 10^{-19} = 4,32 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

donc $\nu_s = \frac{E_{\text{photon}}}{h} = \frac{W_{\text{ext}}(\text{Na})}{h} = \frac{4,32 \cdot 10^{-19}}{6,63 \cdot 10^{-34}} = 6,52 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$

De plus $c = \lambda \times \nu_s$

$\Rightarrow \lambda = \frac{c}{\nu_s} = \frac{3,00 \cdot 10^8}{6,52 \cdot 10^{14}} = 4,60 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 4,60 \cdot 10^{-7} \times 10^9 \text{ nm} = 460 \text{ nm}$ *+ grand violet*

d- Energie cinétique de l'électron arraché :

Si l'énergie du photon E_{photon} est supérieure au travail d'extraction W_{ext} (fréquence $\nu > \nu_s$), l'excédent d'énergie est alors emporté par l'électron sous forme *d'énergie cinétique*...

$$E_c = \frac{1}{2} m_e \times v_e^2 \quad m_e \text{ masse élection, } v_e \text{ vitesse de l'élection}$$

On peut alors écrire selon la conservation de l'énergie :

$$E_{\text{photon}} = W_{\text{ext}} + E_c$$

Cette équation est appelée « équation d'Einstein de l'effet photoélectrique ».

Soit $E_c = E_{\text{photon}} - W_{\text{ext}} \Leftrightarrow E_c = h\nu - h\nu_s$ *→ constante*
 en de forme $y = ax + b$

La courbe $E_c = f(\nu)$ est *droite*.....

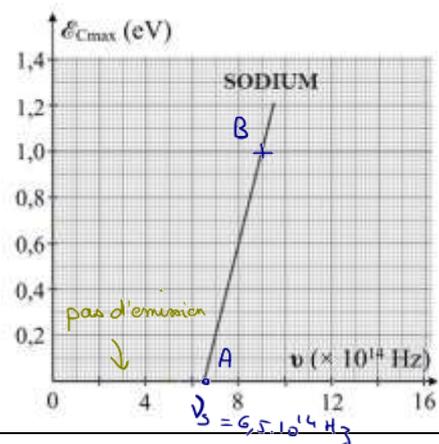
Exercice : Masse d'un électron $m_e = 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$

Calculer la pente de la droite

pente = $\frac{E_c(B) - E_c(A)}{\nu_B - \nu_A}$ *il faut mettre E_c en J*

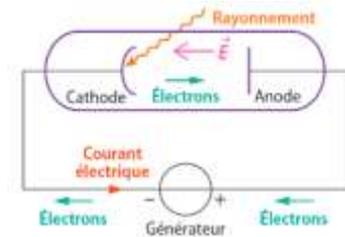
$$= \frac{(1,0 - 0,0) \times 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{9,0 \cdot 10^{14} - 6,5 \cdot 10^{14}} = 6,4 \cdot 10^{-34} \Delta \quad \nu_{\Delta} = \text{Hz}$$

La pente c'est à dire le coefficient directeur est bien égal à la constante de planck h



e- Application de l'effet photoélectrique : La cellule photoélectrique :

Une cellule photoélectrique est constituée de deux électrodes, une anode et une cathode, dans une ampoule où règne le vide. L'anode est reliée au pôle négatif d'un générateur et la cathode au pôle positif.



Le vide étant un isolant, en l'absence de lumière, aucun courant ne circule dans le circuit.

Par contre, lorsqu'on soumet la cathode à un rayonnement de fréquence supérieure à sa fréquence seuil, celle-ci émet des électrons qui subissent la force électrique $\vec{F}_e = q_e \times \vec{E}$

Ceux-ci subissent alors un mouvement accéléré vers l'anode où ils sont captés et créant ainsi un courant électrique dans le circuit.

Les cellules photoélectriques convertissent ainsi un signal lumineux en signal électrique et sont utilisées :

- Pour mesurer l'intensité lumineuse dans les luxmètres, les spectrophotomètres et les spectromètres.
- Dans les interrupteurs contrôlés par la lumière : capteurs de présence, interrupteurs crépusculaires...

II- Interaction lumière matière en spectroscopies UV – visible et IR

1- Les niveaux d'énergie des atomes constituant la matière : RAPPEL de 1^{ère}

L'énergie de l'atome est quantifiée... : Elle ne peut prendre que certaines... valeurs.

Sur un **diagramme d'énergie** on indique, sur des niveaux, les valeurs possibles de l'énergie d'un atome. Le niveau **le plus bas est appelé** état fondamental... de l'atome (qui correspond donc à la valeur la plus basse de l'énergie que peut avoir l'atome). Les niveaux d'énergie supérieurs sont appelés états excités. L'état ionisé... correspond à l'énergie $E_\infty = 0$ eV

Un exemple l'atome d'hydrogène :

Absorption d'énergie

Supposons que l'atome d'hydrogène soit à un niveau excité d'énergie $E_2 = -3,40$ eV. En absorbant l'énergie d'un photon E_{photon} , le niveau d'énergie de l'atome augmente et passe au niveau $E_4 = -0,85$ eV. Quelle est la variation d'énergie $|\Delta E|$ de l'atome ?

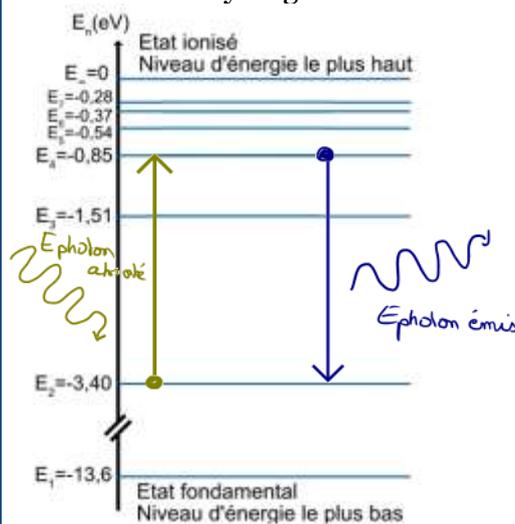
$$|\Delta E| = |E_{\text{finale}} - E_{\text{initiale}}|$$

$$|\Delta E| = |E_4 - E_2|$$

$$|\Delta E| = E_{\text{photon absorbé}}$$

Cela correspond à l'énergie du photon absorbé...

Niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène



Emission d'énergie

Supposons maintenant que l'atome d'hydrogène est au niveau d'énergie $E_4 = -0,85$ eV. En libérant de l'énergie sous forme d'un photon E_{photon} , le niveau d'énergie de l'atome diminue... et passe au niveau $E_2 = -3,40$ eV. Quelle est la variation d'énergie $|\Delta E|$ de l'atome ?

$$|\Delta E| = |E_{\text{finale}} - E_{\text{initiale}}|$$

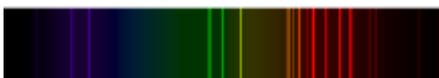
$$|\Delta E| = |E_2 - E_4| = E_{\text{photon émis}}$$

Cela correspond à l'énergie du photon émis...

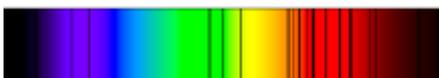
$$E_{\text{photon-absorbé}} = |\Delta E| = |E_{\text{finale}} - E_{\text{initiale}}| = E_{\text{photon-émis}}$$

- L'atome ne peut qu'absorber un photon d'énergie $E_{\text{photon-absorbé}}$ égale à une variation d'énergie permise $|\Delta E|$
- L'atome ne peut qu'émettre un photon d'énergie $E_{\text{photon-émis}}$ égale à une variation d'énergie permise $|\Delta E|$
- A chaque transition... passage d'un niveau d'énergie à un autre, un photon est absorbé ou émis

Autre exemple : l'élément oxygène



Spectre d'émission... les raies colorées correspondent à l'émission de photon



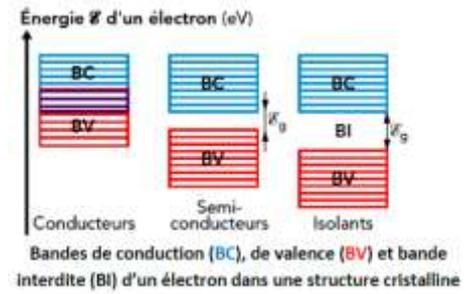
Spectre d'absorption... les raies noires correspondent à l'absorption des photons.

2- Interaction des photons avec des semi-conducteurs :

Les cellules photovoltaïques produisent un courant électrique lorsqu'elles sont soumises à un rayonnement. Elles sont constituées d'un matériau semi-conducteur, comme le silicium, dont les électrons ont une énergie quantifiée :

- en l'absence de lumière, ils occupent des niveaux d'énergie regroupés dans la *bande dite de valence BV*, le matériau est isolant.

- lorsque le matériau est soumis à un rayonnement électromagnétique d'énergie suffisante, des photons sont absorbés et des électrons peuvent accéder la *bande de conduction BC* où ils sont alors mobiles : le matériau devient conducteur.



On définit le rendement d'une cellule photovoltaïque se calcule :

$$\eta = \frac{E_{\text{utile}}}{E_{\text{fournie}}} = \frac{P_{\text{utile}} \times \Delta t}{P_{\text{fournie}} \times \Delta t} = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{fournie}}}$$

avec Puissance $P = \frac{E}{\Delta t}$
 P en Watt. (W) E en Joule..
 η : m.a. pas d'unité

La puissance lumineuse reçue P lumineuse dépend de l'éclairement ϕ , en watt par mètre carré ($W \cdot m^{-2}$) et de la surface S de la cellule photovoltaïque en mètre carré (m^2).

$$\text{Alors } P_{\text{lumineuse}} = \phi \times S \quad \frac{W}{m^2} \times m^2 = W$$

• Rappel : la puissance électrique P électrique d'un dipôle soumis à une tension U et traversé par un courant d'intensité I est :

$$P = U \times I$$