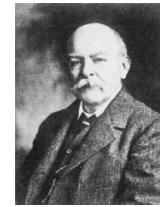


Chapitre 5.1 – Les photons et l'effet photoélectrique

L'intensité d'une onde électromagnétique

En 1884, le physicien britannique John Henry Poynting a démontré à partir des équations de Maxwell que l'intensité d'un champ électromagnétique dans le vide est définie par l'équation suivante :

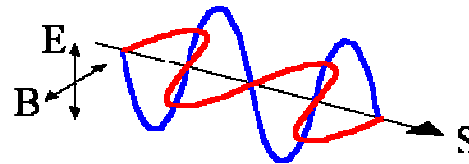
$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$



J.H. Poynting
(1852-1914)

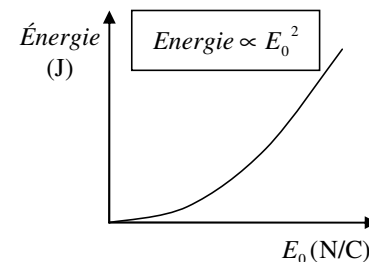
- où $\vec{S}$: L'intensité du champ électromagnétique dans le vide (vecteur de Poynting) (W/m^2)
 $\vec{E}$: Champ électrique évalué à l'endroit du vecteur de Poynting (N/C)
 $\vec{B}$: Champ magnétique évalué à l'endroit du vecteur de Poynting (T)
 μ_0 : Constante magnétique du vide (*Perméabilité du vide*), $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N s}^2/\text{C}^2$

Sur le schéma ci-contre est représenté le vecteur de Poynting $\vec{S}$ issu d'un produit vectoriel entre le champ électrique $\vec{E}$ et le champ magnétique $\vec{B}$ associés à une onde électromagnétique.



L'intensité classique de la lumière monochromatique

En **physique classique**, on interprète la **lumière monochromatique** comme étant une onde électromagnétique pouvant transporter une **énergie** proportionnelle au **carré de l'amplitude maximale** du **champ électrique** sinusoïdale E_0 propageant l'onde électromagnétique. Ce résultat est basé sur la valeur moyenne du vecteur de Poynting d'une onde électromagnétique.



Dans le cas d'une onde électromagnétique plane sinusoïdale de la forme $E = E_0 \sin(\omega t + \phi)$ voyageant dans le vide, la valeur moyenne du vecteur de Poynting est donnée par :

$$\bar{S} = \frac{\epsilon_0 c}{2} E_0^2$$

- où $\bar{S}$: Intensité moyenne de l'onde électromagnétique (W/m^2)
 E_0 : Module du champ électrique maximal de l'onde électromagnétique (N/C)
 c : Vitesse de la lumière ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)
 ϵ_0 : Constante électrique ($\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$)

L'effet photoélectrique

En 1886, le physicien allemand Heinrich Rudolf Hertz réalisa expérimentalement qu'un **matériau métallique exposé** à la **lumière** pouvait **émettre** des **particules chargées négativement** (qui porteront le nom « d'électron »). Cette découverte fut baptisée au nom de **l'effet photoélectrique**. Malheureusement, Hertz ne fut pas en mesure d'expliquer théoriquement le phénomène, car certaines caractéristiques de cet effet ne fonctionnaient pas avec la théorie classique de l'électromagnétisme de l'époque.

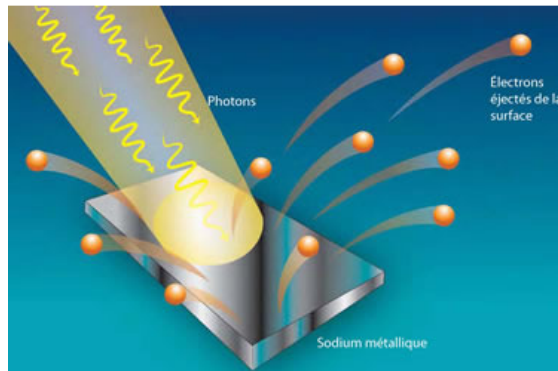


H. R. Hertz
(1857-1894)

Description électromagnétique du phénomène :

Un électron lié à une structure possède une énergie potentielle électrique U_e négative et la somme de son énergie cinétique et de son énergie potentielle électrique est également négative ($K + U_e < 0$).

Pour éjecter des électrons de la structure, il faut fournir beaucoup d'énergie aux électrons. Dans ce phénomène, l'énergie acquise par les électrons provient du champ électromagnétique de la lumière.



Éjection d'électrons d'une plaque métallique de sodium par effet photoélectrique sous la présence d'une source lumineuse.

Après absorption de la lumière, le gain d'énergie de l'électron se transforme en énergie cinétique et l'électron se déplace plus rapidement. Il peut ainsi s'éloigner de la structure en augmentant son énergie potentielle ce qui réduit son énergie cinétique. L'électron sera éjecté si son énergie totale (après le travail W de la lumière) est supérieure à zéro (éjection d'un électron si : $K_i + U_{e_i} + W > 0$).

Application de la collision d'un photon

De nos jours, une variante à l'effet photoélectrique est utilisée dans plusieurs composantes électroniques (les électrons ne sont pas éjectés, mais subissent des variations d'énergie potentielles électriques pouvant générer des courants électriques).

Cellule photoélectrique :

Capteur photosensible dont la résistance varie selon l'exposition à la lumière. Cette cellule est utilisée par exemple pour activer des systèmes d'éclairage automatisés.



Détecteur de luminosité

Cellule photovoltaïque :

Composante électronique qui génère une tension électrique de l'ordre de 0,5 V lorsqu'elle est exposée à la lumière. Cette cellule est utilisée par exemple dans les panneaux solaires.



Panneau solaire

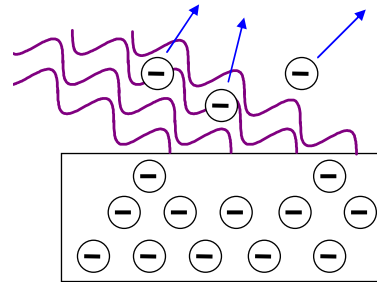
Caractéristique de l'effet photoélectrique

Malgré l'expertise de l'époque en électromagnétisme, l'effet photoélectrique demeurait incompris théoriquement pour la raison suivante :

1) Longueur d'onde très courte :

Lorsque la longueur d'onde est très courte (fréquence élevée), le nombre d'électron éjecté est proportionnel à l'intensité de la lumière.

Exemple : éjection d'un très grand nombre d'électron sous l'exposition d'une lumière violette ($\lambda = 400 \text{ nm}$) sur une plaque de sodium.

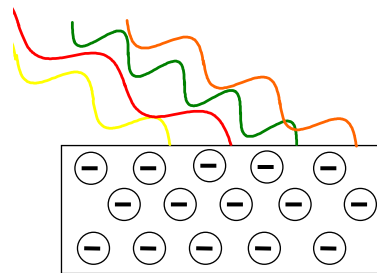


Lumière à longueur d'onde suffisamment petite permettant d'éjecter des électrons.

2) Longueur d'onde trop longue :

Lorsque la **longueur d'onde** est **trop grande** (basse fréquence), il n'y a **pas d'électron éjecté** de la structure **même si l'intensité lumineuse est très élevée**.

Exemple : Aucun électron éjecté pour une plaque de sodium exposé à la lumière rouge ($\lambda = 700 \text{ nm}$), la lumière orange ($\lambda = 650 \text{ nm}$), la lumière jaune ($\lambda = 600 \text{ nm}$) et la lumière verte ($\lambda = 550 \text{ nm}$).

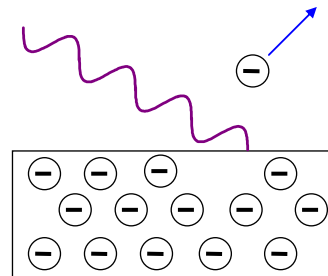


Lumière à trop grande longueur d'onde ne permettant pas d'éjecter un électron.

3) Longueur d'onde inférieure au seuil

Lorsque la **longueur d'onde** est **inférieure** à la **longueur d'onde de seuil** (fréquence supérieure à la fréquence de seuil), il y a des **électrons éjectés** de la structure même si l'intensité lumineuse est très faible.

Exemple : La longueur d'onde de seuil du sodium est égale à $\lambda_0 = 460 \text{ nm}$.



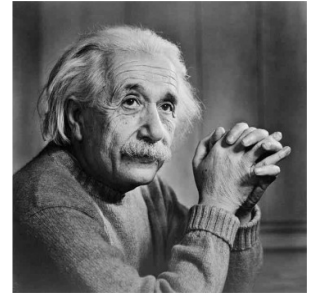
Même à faible intensité, une lumière à longueur d'onde inférieure à la longueur d'onde de seuil permet d'éjecter des électrons.

La conclusion :

La **longueur d'onde** λ de la lumière est un **paramètre très important** dans l'**explication** théorique de l'**effet photoélectrique**. Puisque la théorie de l'électromagnétisme classique considère la longueur d'onde seulement dans le calcul de l'énergie moyenne, on réalise que cette théorie est insuffisante pour expliquer complètement le phénomène.

La quantification de la lumière

Après l'exploit théorique réalisé par Max Planck en 1900 sur son interprétation du spectre du corps noir¹, Albert Einstein **généralisa** en 1905 le concept de **perte d'énergie électromagnétique** par **quanta** au transport d'énergie de la **lumière** par **quanta**. Selon Albert Einstein, si un corps noir perdait de l'énergie lumineuse par quanta, alors la lumière devait uniquement transporter de l'énergie par quanta. On peut résumer le **quanta d'énergie** à une **quantité d'énergie finie** transportée par **une seule particule**.



Albert Einstein
(1879-1955)

Cette hypothèse a permis à Albert Einstein d'introduire la notion de « photon » :

Le photon est une onde-particule qui transporte l'énergie du champ électromagnétique par quanta d'énergie.

Le quanta d'énergie du photon

Grâce à l'hypothèse de la quantification de la lumière effectuée par Albert Einstein, la lumière est maintenant considérée comme étant un faisceau d'onde-particules nommés « photon » se déplaçant chacun à la vitesse de la lumière² c et transportant chacun une quantité d'énergie unique quantifiée E_γ qui est égale à la fréquence f du photon multiplié par le quanta d'énergie fondamentale h qui est la constante de Planck :

En fréquence :

$$E_\gamma = h f$$

En longueur d'onde :

$$E_\gamma = \frac{hc}{\lambda}$$

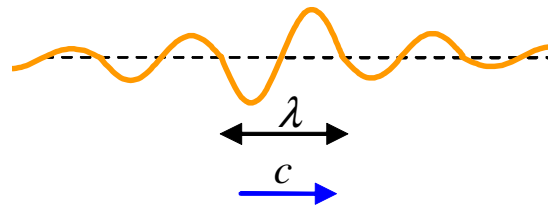
où E_γ : Énergie transportée par le photon (J)

f : Fréquence du photon (s^{-1} ou Hz)

λ : Longueur d'onde de la lumière (m)

h : Constante de Planck ($6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)

c : Vitesse de la lumière ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)



N.B. En physique, on utilise la lettre grecque γ (gamma) pour désigner le photon.

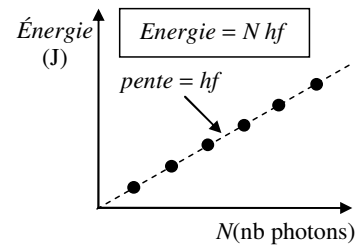
¹ Le spectre du corps noir expliqué par Max Planck sera présenté dans le chapitre 5.3

² Certaine théorie tente de prouver que la vitesse d'un photon n'est pas toujours égale à c . Cependant, la vitesse moyenne $\bar{v}$ d'un groupe de photons (la lumière) est toujours égale à c .

La quantification de l'énergie de lumière monochromatique

En **physique quantique**, on interprète la **lumière monochromatique** comme étant un groupe de N photons transportant chacun une **énergie quantifiée** égale à hf . Une lumière monochromatique peut uniquement transporter une énergie qui est un **multiple entier** N de photons ayant un quanta d'énergie hf :

$$E_f = N hf$$



où E_f : Énergie totale d'une source de lumière monochromatique (J)
 N : Nombre de photons constituant la source de lumière monochromatique
 f : Fréquence de la lumière monochromatique ou des photons (s^{-1} ou Hz)
 h : Constante de Planck ($6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)

Situation 1 : Le nombre de photons émis par un laser. Un laser hélium-néon émet un faisceau de lumière de 0,1 watt dont la longueur d'onde est égale à 633 nm. On désire déterminer le nombre de photons émis par le laser à chaque minute.

Évaluons l'énergie d'un photon :

$$E_\gamma = \frac{hc}{\lambda} \quad \Rightarrow \quad E_\gamma = \frac{(6,63 \times 10^{-34})(3 \times 10^8)}{(633 \times 10^{-9})} \quad \Rightarrow \quad \boxed{E_\gamma = 3,142 \times 10^{-19} \text{ J}}$$

Évaluons l'énergie lumineuse dégagée par le laser durant une minute :

$$E_f = Pt \quad \Rightarrow \quad E_f = (0,1)(60) \quad \Rightarrow \quad \boxed{E_f = 6 \text{ J}}$$

Évaluons le nombre de photon émis par le laser durant une minute :

$$E_f = NE_\gamma \quad \Rightarrow \quad (6) = N(3,142 \times 10^{-19}) \quad \Rightarrow \quad \boxed{N = 1,910 \times 10^{19} \text{ photons}}$$

La quantification d'énergie d'une source de la lumière quelconque

Pour évaluer l'énergie totale d'une source de lumière quelconque, il faut décomposer la lumière en plusieurs sources monochromatique et faire l'addition de ces énergies :

$$E = \sum_f E_f = \sum_f N_f hf$$

où E : Énergie totale de la lumière provenant de la contribution de toutes les fréquences (J)
 E_f : Énergie d'une lumière monochromatique de fréquence f (J)
 N_f : Nombre de photons de fréquence f
 f : Fréquence d'une source de lumière monochromatique (s^{-1} ou Hz)
 h : Constante de Planck ($6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)

Explication quantique de l'effet photoélectrique

En appliquant l'hypothèse de l'existence du photon, Albert Einstein fut en mesure d'expliquer la **nature quantique de l'effet photoélectrique** et il fut récompensé du prix Nobel de physique en 1921 pour ses travaux :

- ❖ Lorsqu'une structure est exposée à la lumière, elle est exposée à un torrent de photons. Ceux-ci entrent en **collision** avec les **électrons** et peuvent être **absorbés**. S'il y a absorption, **l'énergie cinétique** de l'électron sera **augmentée** d'un facteur hf (énergie du photon).
- ❖ Pour que l'électron puisse **être éjecté**, il doit avoir **suffisamment d'énergie** pour quitter la structure ce qui l'invite à **changer d'état** de **liaison** avec la structure. Cette énergie porte le nom de « **travail d'extraction** » ϕ .
- ❖ L'électron ne peut pas accumuler temporairement de l'énergie avec plusieurs photons moins énergétiques pour atteindre le travail d'extraction, car les l'énergie cinétique se dissipent très rapidement dans la structure s'il n'y a pas de changement d'état.
- ❖ Pour être **éjecté**, le **photon doit permettre** dès la collision à l'électron de **changer d'état**. Pour les électrons près de la surface du matériau, il n'y a **pas d'état de transition** entre l'électron lié et l'électron libéré.

Le travail d'extraction

Afin d'éjecter un électron d'une structure, un photon doit être absorbé par un électron et lui fournir une énergie hf supérieure au travail d'extraction ϕ :

$$E_\gamma = hf > \phi$$

où E_γ : Énergie transportée par un photon (J)
 f : La fréquence du photon (s^{-1} ou Hz)
 ϕ : Le travail d'extraction (J ou eV)
 h : Constante de Planck ($6,63 \times 10^{-34}$ J · s)

Matériau	Travail d'extraction
Sodium	2,7 eV
Argent	4,3 eV
Silicium	4,8 eV
Carbone	5,0 e V
Or	5,1 eV

Preuve :

Démontrons par conservation de l'énergie que l'énergie du photon doit être supérieure au travail d'extraction pour éjecter un électron par effet photoélectrique :

$$K_f + U_f = K_i + U_i + W_a \quad (\text{Conservation de l'énergie})$$

$$\Rightarrow K_f + U_f = K_i + U_i + (E_\gamma) \quad (\text{Travail du photon, } W = E_\gamma)$$

Remplaçons le terme d'énergie potentielle électrique finale par zéro et relierons l'énergie potentielle électrique initiale avec l'énergie cinétique initiale afin d'introduire le concept de travail d'extraction :

$$\begin{aligned}
 K_f + U_f &= K_i + U_i + E_\gamma && \text{(Équation précédente)} \\
 \Rightarrow K_f + (0) &= K_i + U_i + E_\gamma && (U_f = \sum_{i=1}^N \frac{kqQ_i}{r_i} = 0, \text{ car } r_i = \infty \text{ lorsque électron éjecté}) \\
 \Rightarrow K_f &= -|K_i + U_i| + E_\gamma && (K_i + U_i < 0, \text{ alors } K_i + U_i = -|K_i + U_i|) \\
 \Rightarrow K_f &= -(\phi) + E_\gamma && \text{(Remplacer travail d'extraction, } \phi = |K_i + U_i|) \\
 \Rightarrow E_\gamma &= K_f + \phi && \text{(Isoler } E_\gamma)
 \end{aligned}$$

Pour que l'électron soit éjecté, il faut que $K_f > 0$. Ainsi $E_\gamma = hf = K + \phi > \phi$. ■

Situation 2 : L'énergie cinétique maximale des photoélectrons. On éclaire une plaque de cuivre ($\phi = 4,7 \text{ eV}$) avec de la lumière ultraviolette à 200 nm et on désire déterminer le module de la vitesse maximale des photoélectrons. (La masse de l'électron est $m = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$)

Évaluons le travail d'extraction pour une plaque de cuivre en J :

$$\begin{aligned}
 \phi &= 4,7 \text{ eV} \Rightarrow \phi = 4,7 \text{ eV} * \frac{1,6 \times 10^{-19} \text{ C}}{e} && (1 e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}) \\
 &\Rightarrow \boxed{\phi = 7,52 \times 10^{-19} \text{ J}} && (1 \text{ CV} = 1 \text{ J})
 \end{aligned}$$

Évaluons l'énergie cinétique maximale de l'électron éjecté :

$$\begin{aligned}
 E_\gamma = K_f + \phi &\Rightarrow \left(\frac{hc}{\lambda} \right) = K_f + \phi && \text{(Énergie du photon)} \\
 &\Rightarrow \frac{(6,63 \times 10^{-34}) (3 \times 10^8)}{(200 \times 10^{-9})} = K_f + (7,52 \times 10^{-19}) && \text{(Remplacer valeurs num.)} \\
 &\Rightarrow \boxed{K_f = 2,425 \times 10^{-19} \text{ J}}
 \end{aligned}$$

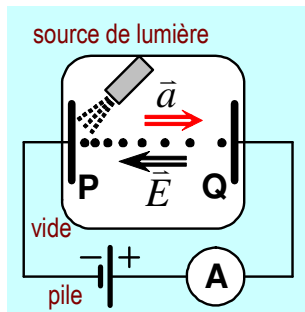
Évaluons la vitesse maximale de l'électron éjecté à partir de son énergie cinétique :

$$\begin{aligned}
 K &= \frac{1}{2} mv^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2K}{m}} && \text{(Isoler } v) \\
 &\Rightarrow v = \sqrt{\frac{2(2,425 \times 10^{-19})}{(9,11 \times 10^{-31})}} && \text{(Remplacer valeurs num.)} \\
 &\Rightarrow \boxed{v = 7,296 \times 10^5 \text{ m/s}} && \text{(Évaluer } v)
 \end{aligned}$$

Montage pour étudier l'effet photoélectrique

1) Voici un **montage** pour **évaluer** la **fréquence de seuil** f_0 d'une plaque métallique associée à l'effet photoélectrique. La fréquence de seuil se définit comme étant la **plus petite fréquence** permettant à un **photon d'éjecter un électron** par effet photoélectrique :

Plaque métallique (P) éclairée par une source de lumière soumise à une différence de potentielle causée par une pile. L'électromotance de la pile est arbitraire. Le champ électrique est orienté de Q vers P ce qui fait accélérer les électrons vers la droite dès qu'ils sont éjectés.



- Si $f_{\text{photon}} < f_0$:

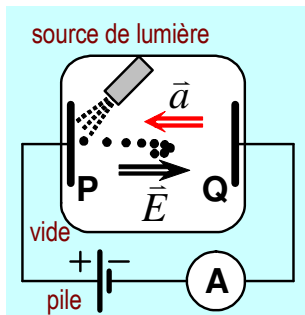
Aucun électron éjecté, donc l'ampèremètre indique 0 A.

- Si $f_{\text{photon}} \geq f_0$:

Électron est éjecté et l'ampèremètre indique un courant non nul.

2) Voici un **montage** pour **évaluer l'énergie cinétique** d'un **électron éjecté** par effet photoélectrique :

Plaque métallique (P) éclairée par une source de lumière soumise à une différence de potentielle causée par une pile. L'électromotance de la pile est ΔV . Le champ électrique est orienté de P vers Q ce qui fait accélérer les électrons vers la gauche. Un électron qui passe de la plaque P à la plaque Q subit une différence de potentielle de $-\Delta V$. Cette variation de potentiel produit une augmentation de l'énergie potentielle de $e\Delta V$, car $\Delta U = q\Delta V = (-e)(-\Delta V) = e\Delta V$. L'électron doit perdre alors cette énergie cinétique pour respecter la conservation de l'énergie.



- Si $f_{\text{photon}} < f_0$:

Aucun électron éjecté, donc l'ampèremètre indique 0 A.

- Si $f_{\text{photon}} \geq f_0$ et $hf_{\text{photon}} < \phi + e\Delta V$:

Électron éjecté, mais ne se rend pas à la plaque Q, donc l'Ampèremètre indique 0 A.

- Si $f_{\text{photon}} \geq f_0$ et $hf_{\text{photon}} > \phi + e\Delta V$:

Électron éjecté et se rend à la plaque Q, donc l'ampèremètre indique un courant non nul.

Ainsi, nous pouvons appliquer l'équation représentant la conservation de l'énergie pour résoudre un problème lié à l'effet photoélectrique correspondant à ce montage :

$$E_f = E_i + W_a \quad \Rightarrow \quad K_f + U_{ef} = K_i + U_{ei} + W_{\text{photon}} \quad (\text{Remplacer terme d'énergie})$$

$$\Rightarrow \quad K_f + U_{ef} = -\phi + W_{\text{photon}} \quad (K_i + U_{ei} = -\phi)$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{K_f + e\Delta V = hf - \phi} \quad \text{où } e\Delta V \text{ est le potentiel d'arrêt du montage}$$

Si l'énergie cinétique finale $K_f < 0$, alors il n'y a pas de courant de mesuré dans l'ampèremètre.