

Deuxième apparition des quanta – L'effet photoélectrique

1. En langage moderne

De quoi s'agit-il ? Une plaque métallique convenablement éclairée émet des électrons.

Un solide est constitué de particules (atomes, molécules, ions) régulièrement disposées. Dans un métal il s'agit d'atomes. Les métaux sont de bons conducteurs électriques : certains électrons dits de conduction sont facilement mis en mouvement.

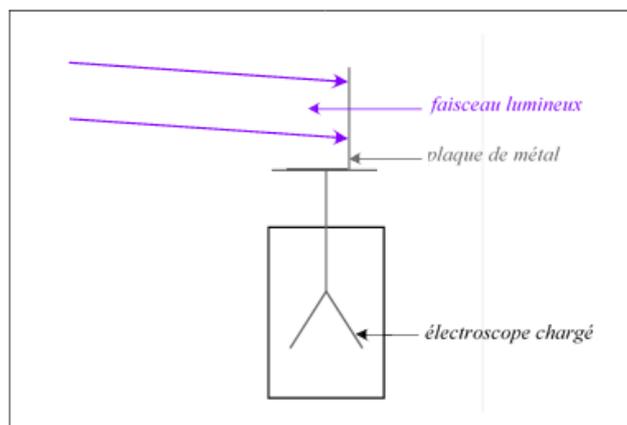
Si un électron quitte le métal, il laisse derrière lui un ion chargé positivement qui l'attire et tend à le faire revenir dans le métal. Les électrons ne peuvent donc pas quitter spontanément le métal. On peut décrire cette situation de plusieurs façons équivalentes :

- Un électron dans le métal n'est pas au même potentiel électrique qu'à l'extérieur.
- Il existe une tension entre le métal et l'extérieur.
- Il faut fournir de l'énergie à l'électron pour l'extraire du métal.

2. La découverte

En 1839 Antoine Becquerel et son fils Alexandre observent les mouvements d'électrodes lors de modifications de leur éclairage. En 1888 Heinrich Hertz étudie l'effet photoélectrique avec Wilhelm Halbwachs et montre que la fréquence de la lumière est déterminante. Mais les électrons ne seront découverts qu'en 1897 par Sir Joseph John Thomson.

Expérience de Heinrich Hertz et Wilhelm Halbwachs



Hertz utilise un électroscope. Il pose sur le plateau de l'électroscope une plaque de zinc préalablement poncée avec de la toile émeri. Il charge la plaque et l'électroscope à l'aide de bâtons de verre ou d'ébonite frottés avec du drap ou de la peau de chat, ce qui lui donne soit des charges positives, soit des charges négatives. Il éclaire la plaque de zinc avec un arc électrique et observe le mouvement éventuel des électrodes de l'électroscope. Il recommence en intercalant une plaque de verre sur le trajet de la lumière.

- Lorsque l'électroscope est chargé négativement puis éclairé, il se décharge : des charges négatives (des électrons) quittent la plaque métallique.
- Lorsqu'on interpose sur le trajet de la lumière, une plaque de verre, qui absorbe les ultraviolets, l'effet cesse.
- Lorsque l'électroscope est chargé positivement puis éclairé, l'électroscope reste chargé : les charges positives retiennent les charges négatives (les électrons).

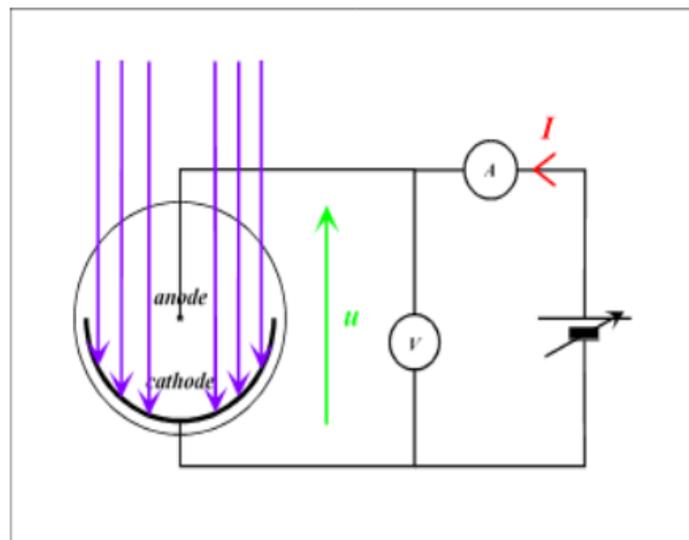
3. Que peut-on en conclure ?

Le phénomène est quasi-instantané ($< 10^{-9}$ s).

L'effet photoélectrique dépend :

- De la tension entre le métal et l'extérieur (électroscope chargé positivement ou négativement)
- De la fréquence de la lumière (influence de la plaque de verre)
- De l'intensité lumineuse (a priori) - Du métal (a priori).

Cellule photoélectrique



La cellule photoélectrique est une ampoule cylindrique vide (10^{-7} mm Hg), transparente aux ultraviolets dans laquelle se trouvent deux électrodes, l'une en forme de cylindre, l'autre en forme de fil rectiligne placée sur l'axe du cylindre.

Le générateur réglable de -10 V à + 10 V (par exemple) établit une tension entre les deux électrodes. Ceci crée un champ électrostatique dont les lignes de champ sont radiales (le long des rayons du cylindre). Le voltmètre mesure la tension appliquée à la cellule.

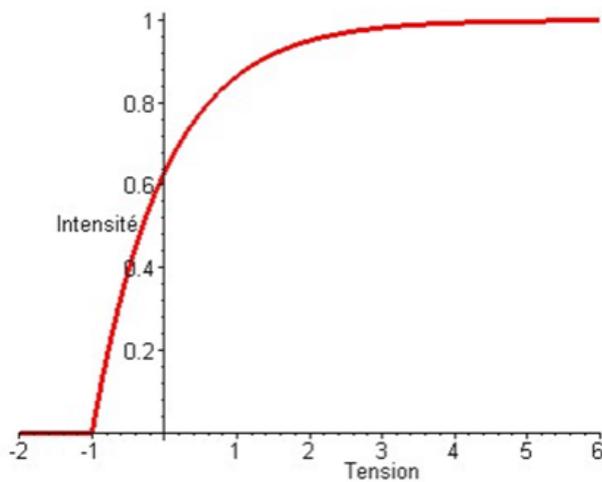
Lorsque la lumière frappe la cathode, elle fournit de l'énergie aux électrons qui quittent la cathode et se dirigent vers l'anode. Ceci crée une intensité mesurée par un galvanomètre - ampèremètre sensible aux très faibles intensités. Les premières cellules fournissaient une intensité de quelques dizaines de pA.

Considérons un électron quittant la cathode.

- Si la tension est positive, il est attiré donc accéléré vers l'anode et il forme dans le circuit un courant électrique.
- Si la tension est négative, l'électron est freiné. Deux cas se présentent :
 1. Il atteint l'anode et il y a courant électrique dans le circuit ;
 2. Ou bien sa vitesse s'annule avant d'atteindre l'anode et il repart vers la cathode - comme une bille qu'on lance vers le haut et qui finalement retombe - et le courant électrique n'apparaît pas.

4. Intensité électrique et tension appliquée

Pour un métal donné, une intensité lumineuse fixée et une fréquence fixée, on trace l'intensité électrique en fonction de la tension appliquée :



Fonction : $I = f(u)$
Variable : la tension
Valeur : l'intensité électrique
Paramètres fixés :
 - le métal,
 - l'intensité lumineuse
 - la fréquence

Toutes les courbes que nous verrons, auront la même allure. Nous constatons trois phases :

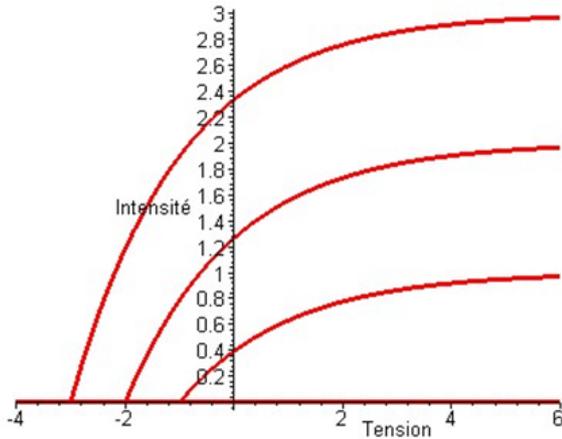
- On peut rendre l'intensité nulle en freinant les électrons grâce à une différence de potentiel adéquate. La tension $-u_0$ est la limite. u_0 est appelée tension d'arrêt. Elle dépend du métal et de la fréquence mais pas de l'intensité lumineuse.
- L'intensité électrique tend vers un maximum I_{\max} quand la tension augmente. Ce maximum dépend de l'intensité lumineuse, de la fréquence et du métal. - Entre les deux nous observons un phénomène intermédiaire.

Le graphique est tracé en prenant u_0 comme unité de tension et I_{\max} comme unité d'intensité.

La Physique du XIXe siècle ne permet pas d'interpréter ces résultats expérimentaux, particulièrement l'influence de la fréquence :

5. Influence de la fréquence

Pour une intensité lumineuse fixée et un métal donné le phénomène dépend de la fréquence de la lumière



Fonction : $I = f(u)$
Variable : la tension
Valeur : l'intensité électrique
Paramètres fixés :

- le métal,
- l'intensité lumineuse

Paramètre étudié

- la fréquence

Nous constatons deux faits :

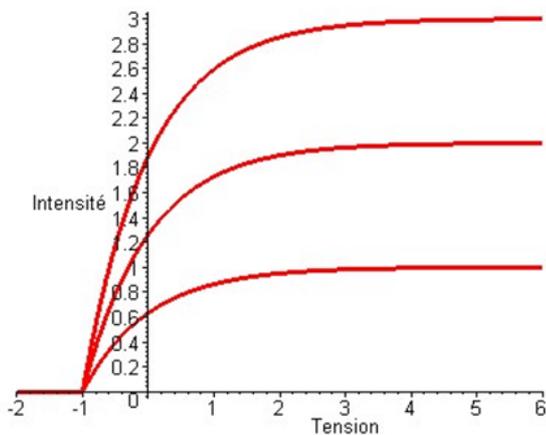
- Il existe une fréquence seuil en dessous de laquelle le métal n'émet aucun électron et ce quelque soit l'intensité de la lumière. Cette fréquence dépend du métal mais pas de l'intensité lumineuse.
- L'intensité maximum dépend de la fréquence.

L'existence d'une fréquence seuil indépendante de l'intensité lumineuse est en contradiction avec la nature ondulatoire de la lumière. Lorsqu'une onde frappe la cathode, l'énergie arrive continument. Avec un faisceau lumineux puissant et en attendant suffisamment, il devrait y avoir assez d'énergie pour provoquer l'effet photoélectrique.

6. Influence de l'intensité lumineuse sur l'intensité maximum

Pour un métal donné et une fréquence fixée l'intensité de saturation dépend de l'intensité lumineuse, elles sont proportionnelles.

Les courbes mettent aussi en évidence que la tension d'arrêt est indépendante de l'intensité lumineuse



Fonction : $I = f(u)$
Variable : la tension
Résultat : l'intensité électrique
Paramètres fixés :

- le métal
- la fréquence

Paramètre étudié :

- l'intensité lumineuse

7. Apparition d'Einstein

7.1 Qui est alors Einstein ?

Albert Einstein est né en 1879 et mort en 1955.

L'année 1905 est une année mémorable pour Einstein et pour la Physique. Agé de 26 ans, il est employé du Bureau des brevets à Berne (Suisse) ; il passe sa thèse et publie quatre articles, l'un d'eux portant sur l'effet photoélectrique (les trois autres sur la dimension des atomes, le mouvement brownien et la relativité restreinte).



16ans-21ans-26ans

7.2 L'hypothèse d'Einstein

Einstein quantifie la lumière elle-même : il la considère comme formée de corpuscules, de quanta de lumière qui seront appelés photons en 1920.

Chaque photon possède une énergie $E = hv$.

Ce sont les quanta d'énergie introduits par Planck mais ce ne sont plus seulement les échanges d'énergie entre la matière et le rayonnement qui sont quantifiés mais la lumière elle-même.

Dans cette hypothèse il y a déjà la « dualité onde - corpuscule » car E est l'énergie du corpuscule photon et elle est liée à la fréquence ν de l'onde. La lumière présente un aspect corpusculaire et un aspect ondulatoire.

8. L'interprétation de l'effet photoélectrique

8.1 La conservation de l'énergie au moment du choc

Son hypothèse lui permet de comprendre l'effet photoélectrique. Il l'interprète comme une collision entre un photon et un électron du métal. Le photon apporte l'énergie $h\nu$ qui sert à extraire l'électron du métal et à donner de l'énergie cinétique à l'électron : $h\nu = E_{\text{extraction}} + E_{\text{cinétique}}$

D'où la fréquence seuil :

L'énergie cinétique est toujours positive donc l'énergie du photon $h\nu$ doit être supérieure à l'énergie d'extraction pour qu'il y ait effet photoélectrique.

$h\nu < E_{\text{extraction}} \quad \text{ou} \quad \nu < \frac{E_{\text{extraction}}}{h} \quad \text{ou} \quad \nu < \nu_{\text{seuil}}$	Il n'y a pas effet photoélectrique.
---	-------------------------------------

$h\nu = E_{\text{extraction}} \text{ ou } \nu = \frac{E_{\text{extraction}}}{h} \text{ ou } \nu = \nu_{\text{seuil}}$	L'électron est extrait mais son énergie cinétique est nulle - il ne va pas loin !
$h\nu > E_{\text{extraction}} \text{ ou } \nu > \frac{E_{\text{extraction}}}{h} \text{ ou } \nu > \nu_{\text{seuil}}$	L'électron est extrait et acquiert une énergie cinétique, il quitte le métal.

L'interprétation d'Einstein permet donc de comprendre l'existence si mystérieuse pour la physique classique de la fréquence seuil.

8,2 Et la tension d'arrêt ...

Quand $u < -u_0$ les électrons n'atteignent pas l'anode, quand $u > -u_0$ ils l'atteignent avec une énergie cinétique plus ou moins élevée selon la valeur de la tension.

Lorsque $u = -u_0$ les électrons quittent la cathode avec une énergie cinétique $E_{\text{cinétique}0}$ et arrivent sur l'anode avec une vitesse nulle, leur énergie cinétique s'est annulée.

La conservation de l'énergie mécanique de l'électron pendant ce trajet donne :

$$E_{\text{cinétique cathode}} + E_{\text{potentielle cathode}} = E_{\text{cinétique anode}} + E_{\text{potentielle anode}}$$

$$E_{\text{cinétique}0} + q_{\text{electron}} V_{\text{cathode}} = 0 + q_{\text{electron}} V_{\text{anode}}$$

$$E_{\text{cinétique}0} + 0 = 0 + (-e) \cdot (-U_0)$$

$$E_{\text{cinétique}0} = eU_0$$

$$\text{or } h\nu = E_{\text{extraction}} + E_{\text{cinétique}0}$$

$$h\nu = h\nu_{\text{seuil}} + eU_0$$

$$\square U_0 = \frac{h\nu}{e} - \frac{h\nu_{\text{seuil}}}{e}$$

On constate que la tension d'arrêt est une fonction affine de la fréquence. Deux points importants :

- La pente (coefficient directeur) de la droite représentative ne dépend pas du métal.
- Seule l'ordonnée à l'origine, par la fréquence seuil, en dépend.

Malgré la lumière ainsi jetée sur l'effet photoélectrique, en 1905 lorsqu'Einstein introduit la quantification de la lumière, cela reste une hypothèse difficile à admettre.

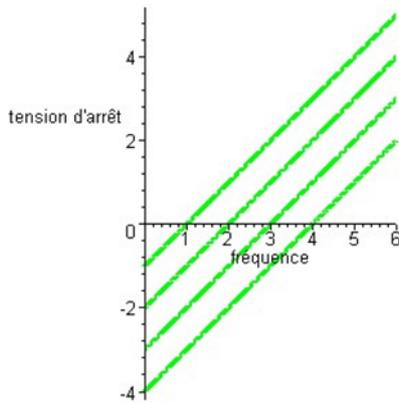
9. Le verdict de l'expérience

9.1 Les études de Millikan

Millikan, physicien américain (1858-1953) connu pour sa mesure de la charge élémentaire grâce à l'expérience de la « goutte d'huile » (1910).

Millikan ne croît pas à l'interprétation d'Einstein. Les preuves de la nature ondulatoire de la lumière sont en effet nombreuses et bien vérifiées dans le domaine des interférences et de la diffraction. Il commence des

études expérimentales dans le but de prouver qu'Einstein a tort. Mais en 1916, quand onze ans après la parution de l'article d'Einstein, Millikan publie ses résultats, ils sont en accord avec l'hypothèse d'Einstein.



Fonction : $u_0 = f(\nu)$

Variable : la fréquence

Valeur : la tension d'arrêt

Paramètre : le métal

La tension d'arrêt ne dépend pas de l'intensité lumineuse

Sur cette représentation graphique les unités sont arbitraires. La tension d'arrêt est par définition positive, les droites ont été prolongées pour mettre en évidence l'énergie d'extraction.

Millikan obtient bien des droites dont l'ordonnée à l'origine dépend du métal et toutes parallèles (même pente).

9.2 Mesure de la constante de Planck

On mesure la pente de ces droites et connaissant la charge élémentaire e on en déduit la constante de Planck h . La valeur trouvée est en bon accord avec les mesures précédentes effectuées à partir du rayonnement thermique.

9.3 Mesure de l'énergie d'extraction

L'ordonnée à l'origine, changée de signe, nommée tension d'extraction, vaut :

$$U_{\text{extraction}} = \frac{h\nu_{\text{seuil}}}{e} = \frac{E_{\text{extraction}}}{e}$$

C'est donc l'énergie d'extraction mesurée en électronvolts (eV). Quelques valeurs :

Métal	Cs	Rb	K	Na	Ca	Mg	Zn	Fe
$E_{\text{extraction}}$ en eV	2,1	2,2	2,4	2,5	2,3	2,4	3,4	4,8

Ces valeurs sont en bon accord avec les mesures antérieures basées sur l'effet thermo-électronique (émission d'électrons par un métal chauffé).