Effet photoélectrique

Objectif : décrire un exemple d'expérience mettant en évidence la nécessité de la notion de photon.

Historique

En essayant de comprendre la nature de la lumière, la physique allait être bouleversée. En effet, au départ, **Newton** (1642–1727) défendit une théorie corpusculaire de la lumière où il affirmait que celle-ci était composée de corpuscules qui se déplaçaient comme de petites billes. Sa théorie s'appuyait sur le fait que l'ombre projetée par la lumière avait des contours nets et que la lumière se déplaçait en ligne droite. Cette théorie décrivait très bien des phénomènes comme la réflexion et la réfraction, mais ne pouvait expliquer les phénomènes de diffraction et les interférences.
Huygens (1629–1695) défendit quant à lui la notion d'onde lumineuse et parvint, en une analyse serrée, à expliquer la réflexion et la réfraction avec la notion d'onde. C'est **Young** (1773–1829) qui fit pencher la balance en faveur de la théorie ondulatoire de la lumière grâce à sa fameuse expérience où il fit passer de la lumière entre deux fentes étroites et où il obtint alors une figure d'interférence propre aux ondes.
Fresnel (1788–1827) est celui qui a complètement rénové l'optique. Ne sachant rien des idées de Young (il ne lisait pas l'anglais !) il retrouva par lui-même les principes énoncés par celui-ci et refit l'expérience sur les franges d'interférence. En 1818, Fresnel obtint le prix de l'Académie des sciences grâce à son mémoire sur les phénomènes de diffraction. Là, il affirme que la lumière n'est pas corpusculaire, qu'elle doit être comprise comme une vibration de l'éther (on n'osait pas imaginer une onde se propageant dans le vide !) transversale à sa direction de propagation.
Maxwell (1831-1879) établit une théorie unifiée de l'électromagnétisme qui le conduisit à considérer la lumière comme une onde due aux vibrations d'un champ électrique associé à un champ d'induction magnétique alternatif perpendiculaire, l'ensemble de ces deux champs constituant l'onde électromagnétique. La théorie de la relativité restreinte a rendu l'existence de l'éther inutile et ainsi la théorie ondulatoire de la lumière semblait bien établie, jusqu'à ce que l'on s'intéresse de plus près au rayonnement du corps noir.

Le corps noir

Un corps porté à une certaine température émet un rayonnement qu'on appelle rayonnement thermique et dont les caractéristiques dépendent de la température et des propriétés du corps en question.

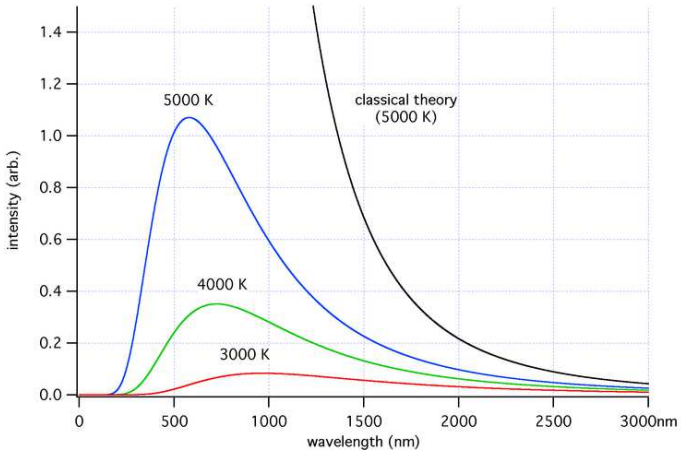


Figure 1 – Rayonnement du corps noir – observations (courbes inférieures) et courbe théorique issue de la théorie classique (classical theory) : écart important pour les faibles longueurs d'onde.

À mesure que la température augmente, le corps commence à rougeoyer, puis à devenir blanc, tout comme le filament de tungstène d'une ampoule.
L'étude du rayonnement thermique montre qu'il est constitué d'une distribution continue de longueurs d'onde comprises dans les régions spectrales de l'infrarouge, du spectre visible et de l'ultraviolet.
Du point de vue classique, le rayonnement thermique résulte de l'accélération de particules chargées situées près de la surface du corps chauffé ; ces particules émettent un rayonnement tout comme une antenne. Vers la fin du 19 ième siècle, il devenait évident que l'explication classique du rayonnement thermique n'était pas satisfaisante : on n'arrivait pas à expliquer la distribution spectrale du rayonnement émis par un corps noir. Les premières tentatives d'explication de la forme de ces distributions à l'aide des modèles classiques échouèrent. La figure ci-dessus représente le tracé expérimental du spectre du rayonnement d'un corps noir avec la courbe prévue par la théorie classique.
Pour les grandes longueurs d'onde, la théorie classique coïncide relativement bien avec les données expérimentales. Mais pour les courtes longueurs d'onde, nous observons un écart considérable entre la courbe théorique et la courbe expérimentale. Cette contradiction est appelée "catastrophe ultraviolette".
La théorie de Maxwell s'avérait donc incapable de résoudre le problème du rayonnement du corps noir. Devant cet échec, Max Planck produisit, en 1900, une expression de la distribution dans laquelle il utilisa un artifice de calcul qui s'avéra génial. Il supposa que les échanges d'énergie, au lieu d'être continus, s'opéraient par quantités finies : ainsi l'énergie était quantifiée. Pour une fréquence donnée ν, il posa que l'énergie transportée était

$$E = h\nu$$

où $h = 6,63.10^{-34}$ J.s est la constante de Planck.
Il appela ces quantités discrètes des quanta , quantum en latin signifiant quantité. Il posa l'hypothèse que ces quantités d'énergie ne pouvaient être que des multiples de la fréquence de base, c'est-à-dire $E_n = nE_0 = nh\nu$ Après avoir introduit cette quantité finie d'énergie, Planck put alors trouver la loi du rayonnement du corps noir. Planck n'avait pourtant pas l'intention de rompre avec la théorie classique et il ne sut pas interpréter correctement sa notion de quantum d'énergie, tellement il lui paraissait impensable que l'énergie rayonnante ne soit pas continue !

L'effet photoélectrique

Ce ne fut que vers 1905 qu'un penseur beaucoup plus hardi, Albert Einstein, utilisa l'hypothèse des quanta de Planck pour expliquer un autre phénomène dont certains aspects résistaient à toute tentative d'interprétation conforme à la théorie classique de l'électromagnétisme : l'effet photoélectrique ! Einstein publia en 1905 un article portant sur l'analyse de l'effet photoélectrique (qui lui valut le prix Nobel en 1921), dans lequel il montrait qu'une onde lumineuse (ou toute autre onde électromagnétique) de fréquence ν peut être considérée comme un flux de photons (le photon désigne un quantum).
Chaque photon transporte une énergie $E = h\nu$ et un photon de la lumière incidente donne toute son énergie à un seul électron du métal.
L'effet photoélectrique fut découvert par hasard par Heinrich Hertz. Il n'accorda cependant pas beaucoup d'attention à ce phénomène. Des expériences montrèrent que certaines surfaces métalliques émettent des électrons sous l'action de la lumière. Mais en analysant ce phénomène de plus près, on se retrouva face à des résultats que la théorie classique ne pouvait pas expliquer correctement, et c'est cela que nous allons étudier maintenant.

Document 1

Extrait d'un article d'Einstein ("On a Heuristic Viewpoint Concerning the Production and Transformation of Light")

It seems to me that the observation associated with black body radiation, fluorescence, the photoelectric effect, and other related phenomena associated with the emission or transformation of light are more readily understood if one assumes that the energy of light is discontinuously distributed in space. In accordance with the assumption to be considered here, the energy of a light ray spreading out from a point is not continuously distributed over an increasing space, but consists of a finite number of energy quanta which are localized at points in space, which move without dividing, and which can only be produced and absorbed as complete units.

Document 2

Extrait du discours de S. Arrhenius lors de la remise du prix Nobel de physique à Albert Einstein en 1921, "pour ses services rendus à la physique théorique, et en particulier pour sa découverte de la loi de l'effet photoélectrique".

Your Majesty, Your Royal Highnesses, Ladies and Gentlemen.

There is probably no physicist living today whose name has become so widely known as that of Albert Einstein(...)

The studies for which Einstein has received the Nobel Prize, falls within the domain of the quantum theory founded by Planck in 1900. This theory asserts that radiant energy consists of individual particles, termed "quanta", approximately in the same way as matter is made up of particles, i.e. atoms.
This remarkable theory, for which Planck received the Nobel Prize for Physics in 1918, suffered from a variety of drawbacks and about the middle of the first decade of this century it reached a kind of impasse. Then Einstein came forward with his work on specific heat and the photoelectric effect.

This latter had been discovered by the famous physicist Hertz in 1887 (...)
A more exhaustive study of this interesting phenomenon was carried out by Hallwachs who showed that under certain conditions a negatively charged body, e.g. a metal plate, illuminated with light of a particular colour - ultraviolet has the strongest effect - loses its negative charge and ultimately assumes a positive charge.
In 1899 Lénard demonstrated the cause to be the emission of electrons at a certain velocity from the negatively charged body.

The most extraordinary aspect of this effect was that the electron emission velocity is independent of the intensity of the illuminating light, which is proportional only to the number of electrons, whereas the velocity increases with the frequency of the light. Lénard stressed that this phenomenon was not in good agreement with the then prevailing concepts.

(...) [In Einstein's interpretation] when a quantum of light falls on a metal plate it can at most yield the whole of its energy to an electron there.

A part of this energy is consumed in carrying the electron out into the air, the remainder stays with the electron as kinetic energy. This applies to an electron in the surface layer of the metal. Only if the quantum contains sufficient energy for the electron to perform the work of detaching itself from the metal does the electron move out into the air.
Consequently, only light having a frequency greater than a certain limit is capable of inducing a photoelectric effect, however high the intensity of the irradiating light.
If this limit is exceeded the effect is proportional to the light intensity at constant frequency.

Einstein's law of the photo-electrical effect has been extremely rigorously tested by the American Millikan and his pupils and passed the test brilliantly. Owing to these studies by Einstein the quantum theory has been perfected to a high degree and an extensive literature grew up in this field whereby the extraordinary value of this theory was proved. Einstein's law has become the basis of quantitative photo-chemistry.

Document 3

Expérience de Philipp Lénard sur l'effet photoélectrique

Bref historique :

- 1839 : Alexandre Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque en étudiant des cellules électrolytiques soumises à de la lumière. Bien que ce ne soit pas rigoureusement la même chose que l'effet photoélectrique, ce travail a initié l'idée d'une relation entre la lumière et les propriétés électroniques des métaux.
- 1887 : Heinrich Hertz observe l'effet photoélectrique "accidentellement" alors qu'il s'intéressait à la production d'ondes électromagnétiques (l'existence de celles-ci venant d'être prouvée par l'écossais James Clark Maxwell). Peu après, d'autres physiciens (notamment Hallwachs) montrent, très clairement qu'une plaque de Zinc soumise à des rayons UV se charge positivement.
- 1902 : Lénard (grâce à l'expérience décrite ci-dessous) observe que l'énergie cinétique des électrons individuels émis par effet photoélectrique augmente avec la fréquence de la lumière utilisée, ce qui est en contradiction avec la théorie ondulatoire de la lumière (Maxwell) qui prédirait que l'énergie des électrons serait proportionnelle à l'intensité de la lumière.

Principe de l'expérience de Lénard et grandeurs mesurées : on place deux plaques métalliques (électrodes) face à face dans un tube à vide.

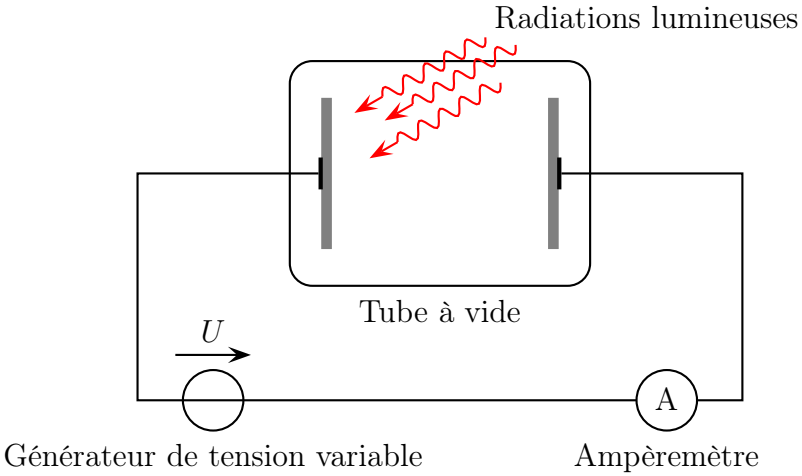


FIGURE 2 – Principe de l'expérience de Lénard

- Sur une des deux électrodes, on envoie de la lumière, de fréquence et d'intensité réglable.
- Grâce à une source de tension, on peut aussi appliquer une tension réglable U entre les deux électrodes.
- Enfin, un ampèremètre permet de mesurer le courant qui circule dans le circuit.

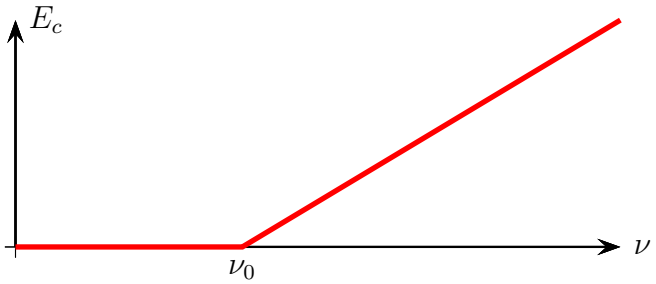
Intérêt du montage : si on observe un courant, c'est que des électrons se déplacent dans le vide de l'électrode de gauche vers celle de droite. Ces électrons auront nécessairement été arrachés par la lumière à l'électrode de gauche.
De plus, quand on applique une tension U négative (dans le sens indiqué sur le schéma), ces électrons ont tendance a être attirés par l'électrode de gauche (car celle-ci est reliée au côté $-$ de la source de tension). Donc, pour qu'ils arrivent à traverser le tube à vide (et que l'on observe un courant), il faudra qu'ils aient acquis initialement une énergie cinétique supérieure à l'énergie potentielle qui fait qu'ils sont attirés vers l'électrode de gauche. Cette énergie potentielle vaut $E_p = qU = -eU$ où U est la tension qui règne entre les plaques et $q = -e$ est la valeur de la charge d'un électron : $e = 1{,}6.10^{-19}$ C.

Cet appareil permet donc non seulement de savoir si la lumière est capable d'arracher des électrons à la plaque métallique, mais aussi de savoir quelle est l'énergie cinétique (donc la vitesse) des électrons après avoir été arrachés.

Constatations / Résultats expérimentaux

- Pour un métal donné, il existe une fréquence minimale (ou "fréquence seuil", notée ν_0) de la lumière en dessous de laquelle aucun électron n'est émis par la plaque. En dessous de la fréquence seuil, quelle que soit l'intensité de la lumière utilisée, aucun électron ne sera arraché. Au dessus de la fréquence seuil, le nombre d'électrons arrachés sera proportionnel à l'intensité de la lumière.

  Ce comportement est très surprenant car on sait que l'énergie totale transportée par une onde ne dépend que de l'amplitude de celle-ci (donc, de son intensité, s'il s'agit d'une onde lumineuse).
- Si on augmente la fréquence de la lumière au delà de la fréquence seuil, l'énergie cinétique des électrons arrachés augmente. Plus précisément on obtient une courbe expérimentale à l'allure suivante :

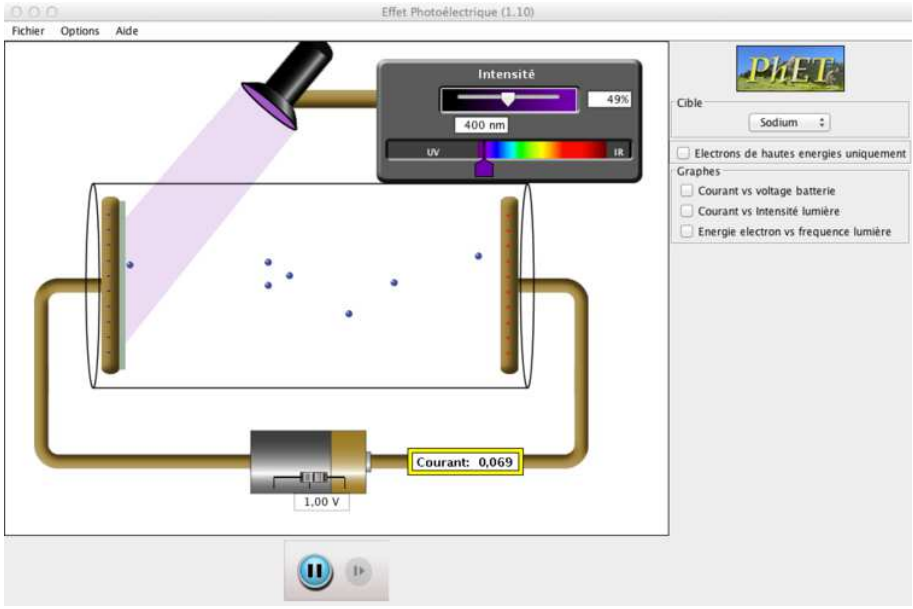


Interprétation : la lumière est constituée de particules (que l'on appelle aujourd'hui "photons").
L'énergie E d'un photon de fréquence ν est : $E = h\nu$ où h est une constante, appelée "constante de Planck", de valeur $6{,}63.10^{-34}$ J.s (Planck avait déjà déterminé la valeur de cette constante dans son étude de la radiation du corps noir).
Pour pouvoir arracher un électron du métal il faut lui fournir une énergie minimale, appelée "travail de sortie" ou "travail d'extraction", que l'on notera W_{ext}.
On voit que $W_{\text{ext}} = h\nu_0$, où ν_0 est la fréquence seuil de l'effet photoélectrique.
Si la lumière utilisée a une fréquence ν supérieure à la fréquence seuil, des électrons vont pouvoir être arrachés (car les photons ont une énergie supérieure au "travail d'extraction").
De plus, d'après la conservation de l'énergie, les électrons arrachés, auront une énergie cinétique E_c telle que :

$$h\nu = W_{\text{ext}} + E_c$$

Document 4

Nous allons utiliser l'animation réalisée en langage "java" mise en ligne par l'université du Colorado à l'adresse http://phet.colorado.edu/fr/simulation/photoelectric



Première approche : faire varier l'intensité et la longueur d'onde de la lumière, ainsi que la tension appliquée entre les plaques, et regarder sur ce qui se passe au niveau de l'émission des électrons.

Document 5

Travaux d'extraction (ou "work functions" en anglais) pour divers métaux

Element	Aluminum	Cadmium	Calcium	Carbon	Cesium	Cobalt	Copper	Gold	Iron
W_{ext} (eV)	4,08	4,07	2,9	4,81	2,1	5,0	4,7	5,1	4,5

Lead	Magnesium	Mercury	Nickel	Potassium	Platinum	Silver	Sodium	Uranium	Zinc
4,14	3,68	4,5	5,01	2,3	6,35	4,73	2,28	3,6	4,3

Remarque : les travaux d'extraction sont données en "électrons volts" eV qui est une unité d'énergie très utilisée quand on s'intéresse à des "petites" énergies (typiquement à l'échelle d'un seul atome ou d'un seul électron). On a 1 eV $= 1{,}6.10^{-19}$ J.

Questions

Répondez précisément et de façon concise en utilisant les documents fournis ou d'autres sources, à préciser le cas échéant. Justifiez et rédigez vos réponses.

Q1 - Le terme "photon" a été introduit par le chimiste Gilbert Lewis en 1926. Comment Einstein appelait-il ces particules ?

Q2 - Expliquez clairement quel aspect de l'effet photoélectrique est en contradiction avec une théorie purement ondulatoire de la lumière, et pourquoi l'introduction de la notion de photon résout le problème.

Q3 - Quel physicien avait, avant Einstein, émis l'idée que l'énergie lumineuse pouvait être constituée de particules individuelles ou "quanta" (de la même façon que la matière est constituée d'atomes).

Q4 - À l'aide du document 5, calculez la fréquence seuil de la lumière permettant une émission photoélectrique pour du Zinc, pour du Platine et pour du Calcium. Dans chaque cas, donner la longueur d'onde correspondante puis indiquez de quel type de radiation il s'agit. Vérifiez vos réponses en utilisant la simulation du document 4.

Q5 - À votre avis, quelle est la valeur de la pente de la droite dans la courbe représentative de E_c en fonction de ν (doc. 3) dans l'expérience de Lénard.

On réalise l'expérience de Lénard avec une plaque de Zinc, en utilisant une lumière ultraviolette de longueur d'onde 200 nm.

Q6 - Y aura-t-il des électrons arrachés ?

Q7 - Si oui, quelle sera leur énergie cinétique juste après avoir été arrachés.

Q8 - Si on veut empêcher ces électrons d'atteindre l'autre électrode, quelle tension U faut-il appliquer entre les deux électrodes (cette tension s'appelle le "potentiel d'arrêt").

Q9 - Vérifiez vos réponses en utilisant la simulation du document 4.

Q10 - Quel est le métal noté "inconnu" de la simulation du document 4 ?

Q11 - En plus de l'effet photoélectrique, quels autres phénomènes ont conduit à l'introduction du concept de photon ?