

Approche Documentaire : L'effet photoélectrique

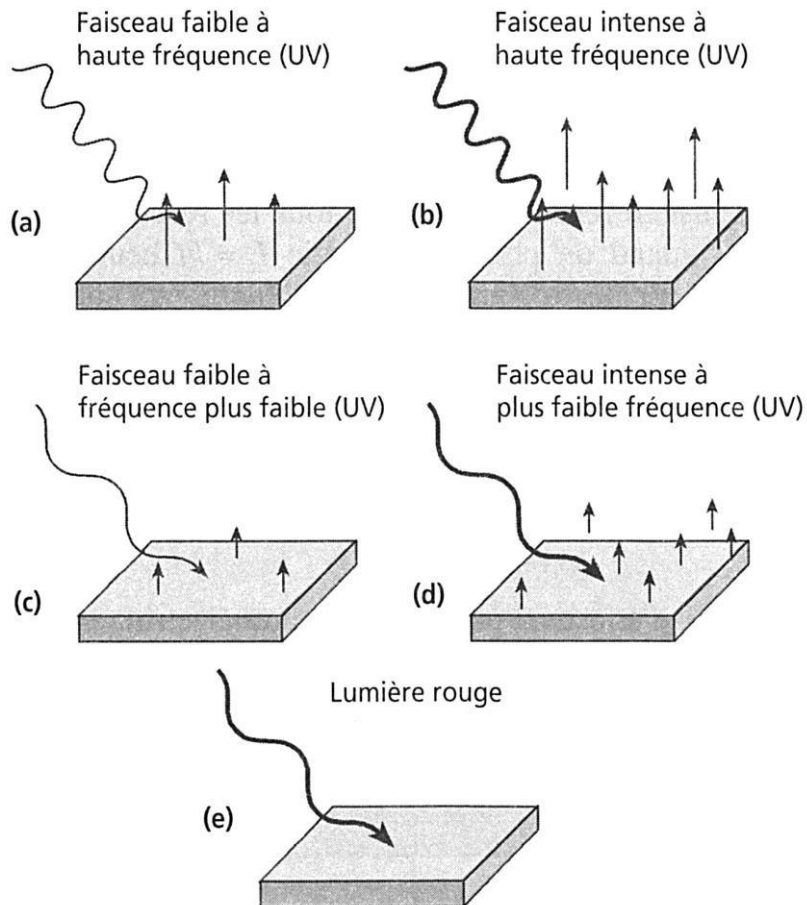
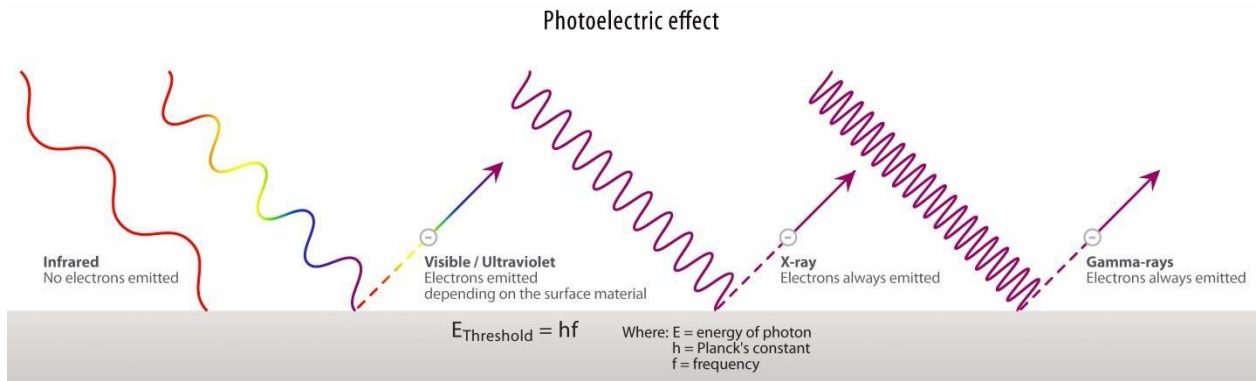


Figure 3 L'effet photoélectrique. **(a)** Un rayonnement peu intense, dans les hautes fréquences de l'ultraviolet, produit quelques électrons rapides. **(b)** Un rayonnement intense aux mêmes fréquences produit de nombreux électrons rapides. **(c)** Un rayonnement ultraviolet peu intense de plus basse fréquence, produit un petit nombre d'électrons lents. **(d)** De la lumière rouge (fréquence beaucoup plus faible) ne produit pas d'électrons du tout, quelle que soit son intensité.

■ **Source** : Carlos Galle, *Supercordes et autres ficelles, Voyage au cœur de la physique*, Dunod, 2004, p. 467.

Document 1 : Expérience de Hallwachs (1888)

■ **Source** : Pérez, Carles, Pujol, *Quantique, fondement et applications*, de Boeck, 2013, p. 46-47.

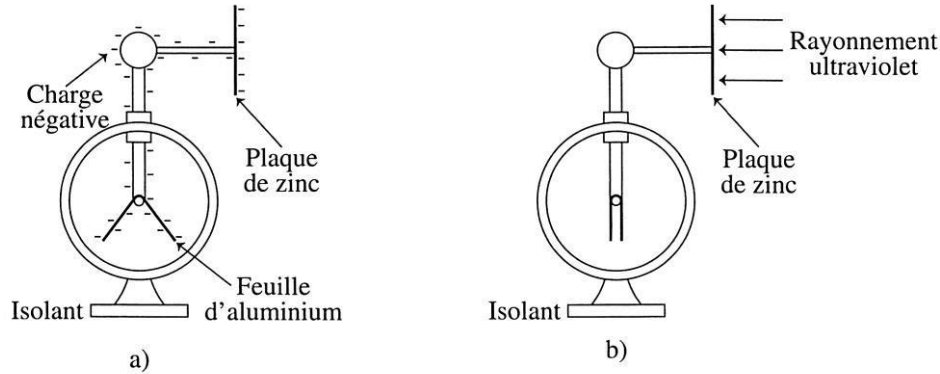


Figure 1 Expérience de Hallwachs

« L'*effet photoélectrique* est l'extraction des électrons d'un matériau par un rayonnement dont la fréquence est supérieure un certain seuil. Il fut observé pour la première fois en 1887, par hasard, par Hertz, alors qu'il cherchait à vérifier expérimentalement la nature électromagnétique de la lumière.

On le met aisément en évidence à l'aide d'une expérience analogue à celle du physicien allemand Wilhelm Hallwachs [Fig. 1], lequel montra le premier, en 1888, que les métaux électriquement neutres, soumis à un rayonnement ultraviolet, se chargeaient positivement. On place d'abord [Fig. 1.a] *une plaque de zinc* sur un électroscope que l'on a chargé négativement par contact avec un bâton d'ébonite frotté avec de la laine. Ensuite [Fig. 1.b], on éclaire la plaque de zinc à l'aide d'une lampe à vapeur de mercure. On constate alors que l'électroscope se décharge : il a donc perdu des charges négatives. Avec un électroscope chargé positivement, on n'observe en revanche aucune décharge.

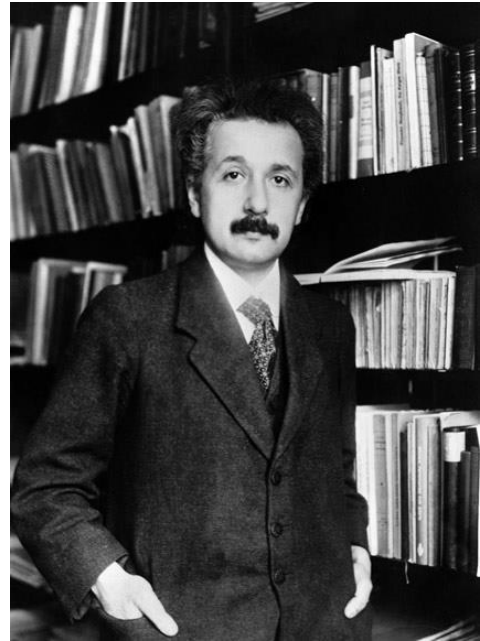
On constate, en outre, que *le phénomène est pratiquement instantané* : il se produit dès que le faisceau lumineux atteint le métal. On observe également qu'en interposant, entre la source et la plaque de zinc, une lame de verre, qui absorbe les rayons ultraviolets émis par la lampe, l'électroscope ne se décharge pas, ce qui montre que *la composante ultraviolette* du rayonnement joue un rôle décisif. »

Document 2 : Einstein (1905)

■ **Source** : Albert Einstein, « Un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière. » dans *Annalen der Physik*, vol. XVII, 1905, p. 132-148 = *Œuvres choisies*, t. 1, Quanta, Paris, Seuil, 1989, p. 39-40, 50-53 :

« Il existe une profonde différence formelle entre les représentations théoriques que se sont forgées les physiciens à propos des gaz et des autres corps pondérables, et la théorie de Maxwell des processus électromagnétiques dans ce qu'il est convenu d'appeler l'espace vide. En effet, alors que nous considérons que l'état d'un corps est parfaitement déterminé par les positions et vitesses d'un nombre d'atomes et d'électrons, très grand certes, mais néanmoins fini, nous nous servons, pour la détermination de l'état électromagnétique d'une région de l'espace, de fonctions d'espace continues, si bien que nous ne pouvons pas considérer qu'un nombre fini de grandeurs suffise à fixer complètement l'état électromagnétique de l'espace. Selon la théorie de Maxwell, l'énergie doit être conçue, pour tous les phénomènes purement électromagnétiques, et donc également pour la lumière, comme une fonction continue de l'espace, alors que l'énergie d'un corps pondérable doit, selon la conception actuelle des physiciens, être décrite comme une somme portant sur les atomes et les électrons. L'énergie d'un corps pondérable ne peut pas être divisée en parties aussi nombreuses et aussi petites que l'on veut, alors que l'énergie d'une radiation lumineuse émise par une source de lumière ponctuelle est, selon la théorie de Maxwell de la lumière (ou, selon toute théorie ondulatoire), distribuée de façon continue sur un volume sans cesse croissant.

La théorie ondulatoire de la lumière opérant avec des fonctions d'espace continues s'est avérée parfaite pour ce qui est de la description des phénomènes purement optiques et il se peut qu'elle ne soit jamais remplacée par une autre théorie. Il ne faut cependant pas perdre de vue que les observations optiques portent sur des valeurs moyennes dans le temps, et pas sur des valeurs instantanées ; il n'est pas inconcevable, bien que les théories de la diffraction, de la réflexion, de la réfraction, de la dispersion, etc., soient entièrement confirmées par l'expérience, que la théorie de la lumière qui opère sur des fonctions continues de l'espace puisse conduire à des contradictions avec l'expérience lorsqu'elle est appliquée aux phénomènes de production et de transformation de la lumière.



De fait, il me semble que *les observations portant sur le "rayonnement noir", la photoluminescence, la production de rayons cathodiques par la lumière ultraviolette*, et d'autres classes de phénomènes concernant la production ou la transformation de la lumière, apparaissent comme plus compréhensibles si l'on admet que l'énergie de la lumière est distribuée de façon discontinue dans l'espace. Selon l'hypothèse envisagée ici, lors de la propagation d'un rayon lumineux émis par une source ponctuelle, l'énergie n'est pas distribuée de façon continue sur des espaces de plus en plus grands, mais est constituée d'un nombre fini de quanta d'énergie localisés en des points de l'espace, chacun se déplaçant sans se diviser et ne pouvant être absorbé ou produit que tout d'un bloc.

[...]

8. Production de rayons cathodiques par éclaircissement d'un corps solide

La conception usuelle, selon laquelle l'énergie de la lumière est distribuée de façon continue dans l'espace où elle est rayonnée, présente, quand on tente d'expliquer les phénomènes photoélectriques, de très sérieuses difficultés qui sont exposées dans un travail décisif de M. Lenard [1902].

La conception selon laquelle la lumière excitatrice est constituée de *quanta d'énergie* $(R/N)\beta v$ permet de concevoir la production de rayons cathodiques par la lumière de la façon suivante. Des quanta d'énergie pénètrent dans la couche superficielle du corps ; leur énergie est transformée, au moins en partie, en énergie cinétique des électrons. La représentation la plus simple que l'on puisse s'en faire est celle d'un quantum de lumière cédant son énergie à un seul électron ; nous allons supposer que c'est bien ce qui se passe. Il n'est pas exclu cependant que des électrons ne prennent qu'une partie de l'énergie des quanta de lumière. Un électron, auquel de l'énergie

cinétique a été fournie à l'intérieur du corps, atteint la surface en ayant perdu une partie de son énergie cinétique. Nous allons supposer, de plus, que tout électron doit, pour pouvoir quitter un corps, fournir un certain travail P (caractéristique du corps). Les électrons qui quittent le corps avec la vitesse normale la plus élevée sont ceux qui se trouvent immédiatement à la surface et qui ont été excités normalement à celle-ci. L'énergie cinétique de ces électrons est :

$$\frac{R}{N} \beta v - P.$$

Si le corps est porté au potentiel positif Π , s'il est entouré de conducteurs à un potentiel nul, et si Π est tout juste capable d'empêcher le corps de perdre de l'électricité, on a

$$\Pi \varepsilon = \frac{R}{N} \beta v - P,$$

où ε désigne la charge électrique de l'électron. Soit encore :

$$\Pi E = R \beta v - P',$$

où E désigne la charge d'un équivalent-gramme d'ions monovalents et P' le potentiel, par rapport au corps, de cette quantité d'électricité négative.

Posons $E = 9,6 \cdot 10^3$; $\Pi \cdot 10^{-8}$ est alors le potentiel en volts du corps illuminé dans le vide.¹

Afin de voir d'abord si la relation ainsi déduite donne un ordre de grandeur conforme à l'expérience, posons $P' = 0$, $v = 1,03 \cdot 10^{15}$ (ce qui correspond à la limite ultraviolette du spectre solaire) et $\beta = 4,866 \cdot 10^{-11}$. Nous obtenons $\Pi \cdot 10^{-8} = 4,3 \text{ volts}$; résultat conforme, en ordre de grandeur, à ceux de M. Lenard.

Si la formule obtenue est exacte, Π en fonction de la fréquence de la lumière excitatrice doit être, en coordonnées cartésiennes, une droite dont la pente ne dépend pas de la substance étudiée.

Autant que je puisse en juger, notre conception n'est pas en contradiction avec les propriétés de l'effet photoélectrique telles qu'elles ont été observées par M. Lenard. Si chaque quantum d'énergie de la lumière excitatrice cède son énergie à un électron indépendamment de tous les autres, ***la distribution des vitesses des électrons, c'est-à-dire la qualité du rayonnement cathodique produit, est indépendante de l'intensité de la lumière excitatrice ; en revanche, le nombre des électrons qui quittent le corps doit, lui, être, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnel à l'intensité de la lumière excitatrice.***

[...] Dans ce qui précède, on a supposé que l'énergie, du moins celle d'une partie des quanta d'énergie de la lumière productrice, n'était jamais cédée qu'à un seul électron. Si l'on ne fait pas cette hypothèse, la plus simple à concevoir, on obtient à la place de l'équation précédente $\Pi E + P' \leq R \beta v$. »

Document 3 : Expérience de Millikan (1916)

➔ Animation java à télécharger et à utiliser pour comprendre l'expérience et le rôle du potentiel d'arrêt : <http://phet.colorado.edu/fr/simulation/photoelectric>

■ **Source** : Pérez, Carles, Pujol, *Quantique*, fondement et applications, de Boeck, 2013, p. 49-50 :

¹ Einstein utilise le système CS électrostatique. Dans le système MKSA, on a : $E = 9,6 \cdot 10^4$; Π donne alors directement le potentiel. Le 10-88888 provient du facteur 10 sur E et de c que, dans le système CGS, R a une valeur 107 fois plus grande que celle en système MKSA. Dans les deux systèmes, on trouve la même tension en volts.

« À partir d'une étude expérimentale complète sur des métaux alcalins (sodium, lithium, potassium), Millikan vérifia l'hypothèse d'Einstein, et, du même coup, détermina une nouvelle valeur de la constante de Planck.

Son expérience, dont il publia les résultats en 1916, consistait à envoyer une lumière monochromatique, de fréquence ν , sur une cathode métallique afin de provoquer l'extraction de photoélectrons, ces derniers étant collectés par une anode portée à un potentiel négatif réglable [Fig. 2]. Pour une fréquence ν fixée, Millikan mesura alors le potentiel d'arrêt, c'est-à-dire la valeur $-V_a < 0$ du potentiel de l'anode nécessaire pour arrêter ces photoélectrons, et donc annuler le courant I dans le circuit.

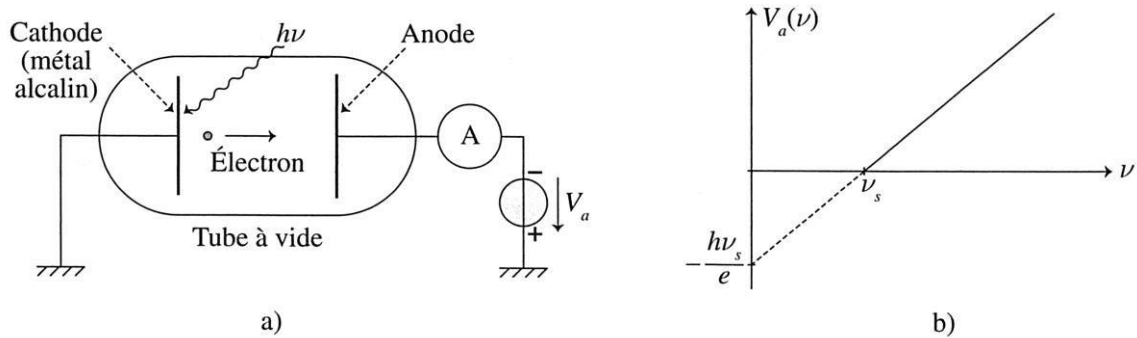


Figure 2 a) Schéma du montage de l'expérience de Millikan b) Graphe du potentiel d'arrêt en fonction de la fréquence

La conservation de l'énergie mécanique entre la cathode et l'anode, $(\mathcal{E}_k + \mathcal{E}_p)_C = (\mathcal{E}_k + \mathcal{E}_p)_A$, donne, puisque par définition du potentiel d'arrêt $\mathcal{E}_{k,A} = 0$ et que le potentiel de la cathode est pris nul ($\mathcal{E}_{p,C} = -eV_C = 0$) :

$$\mathcal{E}_{k,C} = -e(-V_a) = eV_a \text{ avec } \mathcal{E}_{k,C} = h\nu - W_s = h(\nu - \nu_s)$$

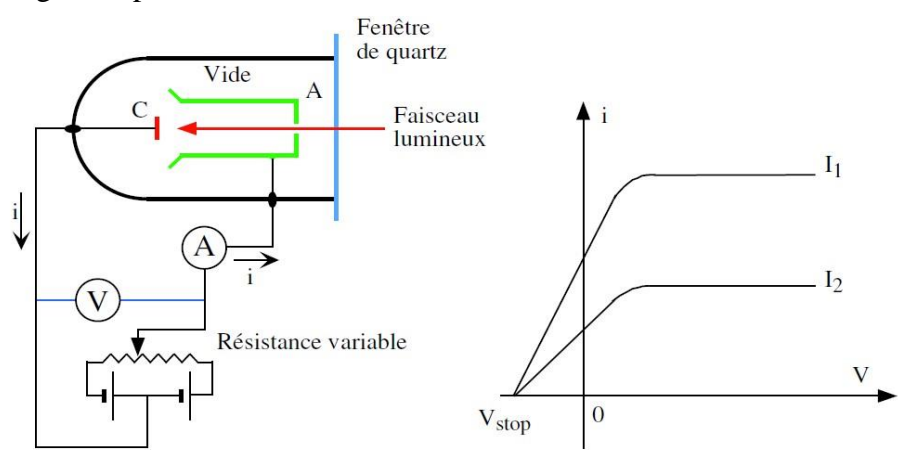
[W_s notant le travail de sortie, c'est-à-dire l'énergie minimale nécessaire pour extraire l'électron du métal]

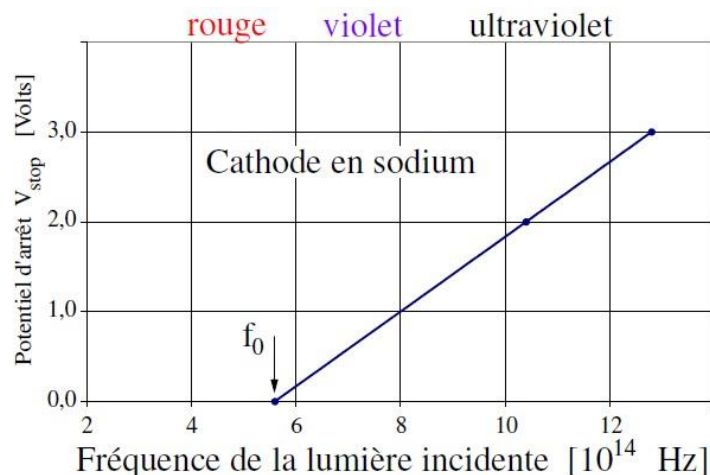
Il en résulte la relation affine suivante :

$$V_a(\nu) = \frac{h}{e}(\nu - \nu_s)$$

Le tracé de V_a , en fonction de ν , qui est une droite de pente h/e et d'ordonnée à l'origine $-h\nu_s/e$ [Fig. 2.b], permet à Millikan d'accéder à h connaissant la valeur de e . Il trouva $h = 6,57 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

, soit la valeur actuellement admise avec une précision meilleure que 1%. »





Document 4 : Naissance du "photon" (1926)

■ **Source** : Gilbert N. Lewis, 29 octobre 1926, dans *Nature* n°1981 (18 déc. 1926), vol. 118, p. 874 :

« Whatever view is held regarding the nature of light, it must now be admitted that the process whereby an atom loses radiant energy, and another near or distant atom receives the same energy, is characterised by a remarkable abruptness and singleness.

We are reminded of the process in which a molecule loses or gains a whole atom or a whole electron but never a fraction of one or the other. When the genius of Planck brought him to the first formulation of the quantum theory, a new kind of atomicity was suggested, and thus Einstein was led to the idea of light quanta which has proved so fertile. Indeed, we now have ample evidence that radiant energy (at least in the case of high frequencies) may be regarded as travelling in discrete units, each of which passes over a definite path in accordance with mechanical laws.

[...] It would seem inappropriate to speak of one of these hypothetical entities as a particle of light, a corpuscle of light, a light quantum, or a light quant, if we are to assume that it spends only a minute fraction of its existence as a carrier of radiant energy, while the rest of the time it remains as an important structural element within the atom. It would also cause confusion to call it merely a quantum, for later it will be necessary to distinguish between the number of these entities present in an atom and the so-called quantum number. I therefore take the liberty of proposing for this hypothetical new atom, which is not light but plays an essential part in every process of radiation, the name *photon*. »

Document 5 : Einstein (1936)

■ **Source** : Albert Einstein et Léopold Infeld, *L'évolution des idées en physique*, (1936), trad. Par Maurice Solovine, Paris, Flammarion, 1983, p. 278-182:

« Considérons une muraille bâtie au bord de la mer.

Les vagues la frappent continuellement, enlèvent une partie de sa surface, se retirent et laissent le chemin libre à d'autres vagues qui avancent. La masse de la muraille décroît et nous pouvons nous demander combien il en est enlevé pendant un an par exemple. Maintenant, représentons-nous un processus différent. Nous voulons diminuer la masse de la muraille de la même quantité que dans le cas précédent, mais par un autre procédé. Nous tirons contre elle des balles, et



des fragments s'en détachent aux endroits qu'elles touchent. La masse de la muraille diminuera, et nous pouvons très bien imaginer que dans les deux cas la même réduction de la masse soit obtenue. Mais l'aspect de la muraille nous permet de savoir si c'est la vague continue de la mer ou si c'est la pluie de balles discontinue qui a été en action. Il nous sera utile, pour comprendre les phénomènes que nous sommes en train de décrire, de garder dans la mémoire la différence entre l'action des vagues marines et celle de la pluie de balles.

Nous avons dit antérieurement qu'un fil chauffé émet des électrons. Ici nous voulons introduire un autre procédé pour arracher des électrons à un métal. Une lumière homogène, par exemple violette, qui a, comme l'on sait, une longueur d'onde définie, frappe une surface métallique et lui arrache des électrons. Une pluie de ces derniers se déplace avec une certaine vitesse. Conformément au principe [de conservation de l']énergie, nous pouvons dire : l'énergie de la lumière est partiellement transformée en l'énergie cinétique des électrons arrachés. La technique expérimentale moderne nous met en état d'enregistrer ces balles électroniques, de déterminer leur vitesse et, par suite, leur énergie. Cet arrachement d'électrons par la lumière frappant un métal est appelée *effet photoélectrique*.

Notre point de départ était l'action d'une onde lumineuse homogène, d'une intensité définie. Comme dans toute expérience, nous devons modifier nos dispositifs pour voir s'il en résulte quelque influence sur l'effet observé.

Commençons par faire varier l'intensité de la lumière violette homogène qui frappe la plaque métallique, et voyons dans quelle mesure l'énergie des électrons arrachés dépend de l'intensité de la lumière. Essayons de trouver la réponse par le raisonnement au lieu de l'obtenir par l'expérience. Nous pourrions argumenter ainsi : dans l'effet photoélectrique, une portion définie d'énergie radiante est transformée en énergie cinétique des électrons. Si nous éclairons de nouveau la plaque avec la lumière de même longueur d'onde, mais venant d'une source plus intense, l'énergie des électrons arrachés devrait être plus grande, puisque la radiation est plus riche en énergie. **Nous devrions, par conséquent, nous attendre à ce que la vitesse des électrons arrachés augmente si l'intensité de la lumière croît. Mais l'expérience contredit notre prévision.** Une fois de plus, nous voyons que les lois de la nature ne sont pas telles que nous voudrions qu'elles fussent. Nous sommes en présence de l'une des expériences qui, contredisant nos prévisions, renverse la théorie sur laquelle ces dernières étaient fondées. Le résultat expérimental réel est, du point de vue de la théorie ondulatoire, surprenant. Les électrons observés ont tous la même vitesse, la même énergie, qui ne varie pas avec l'accroissement de l'intensité de la lumière.

Ce résultat expérimental ne pouvait pas être prévu par la théorie ondulatoire. Une fois de plus une nouvelle théorie naît du conflit entre l'ancienne théorie et l'expérience.

Nous voulons être délibérément injustes à l'égard de la théorie ondulatoire de la lumière, oublier ses grandes conquêtes et son explication éclatante de l'infléchissement de la lumière autour de très

petits obstacles. Concentrant notre attention sur l'effet photoélectrique, nous demandons à la théorie de nous en donner une explication adéquate. Nous ne pouvons manifestement pas déduire de la théorie ondulatoire l'indépendance de l'énergie des électrons vis-à-vis de l'intensité de la lumière, par laquelle ils ont été arrachés à la plaque métallique. Nous allons, par conséquent, essayer une autre théorie. Nous nous rappelons que la théorie corpusculaire de Newton, tout en expliquant beaucoup de phénomènes de la lumière, ne réussit pas à rendre compte de l'infléchissement de cette dernière, que nous voulons maintenant négliger délibérément. Au temps de Newton, le concept d'énergie n'existait pas. Les corpuscules de lumière étaient, d'après lui, sans poids ; chaque couleur gardait son caractère de substance propre. Plus tard, quand le concept d'énergie fut créé et qu'on reconnut que la lumière transporte de l'énergie, personne ne pensa à appliquer ces concepts à la théorie corpusculaire de la lumière. La théorie de Newton était morte et, avant notre siècle, sa renaissance n'a pas été envisagée sérieusement.

Pour nous en tenir à l'idée principale de la théorie newtonienne, nous devons supposer que la lumière homogène est composée de grains d'énergie et remplacer les anciens corpuscules de lumière par les quanta de lumière, que nous appellerons photons ; ce sont de petites portions d'énergie, qui se déplacent à travers l'espace vide avec la vitesse de la lumière. La renaissance de la théorie newtonienne sous cette forme nouvelle conduit à la théorie des quanta de lumière. Non seulement la matière et la charge électrique, mais aussi l'énergie radiante a une structure granulaire, c'est-à-dire qu'elle est constituée par des quanta de lumière. Outre des quanta de matière et des quanta d'électricité il y a encore des quanta d'énergie.

L'idée des quanta d'énergie fut introduite pour la première fois par Planck, au commencement de ce siècle, afin d'expliquer certains effets beaucoup plus compliqués que l'effet photoélectrique. Mais ce dernier met en évidence de la façon la plus claire et la plus simple la nécessité de changer nos anciens concepts.

Il devient immédiatement évident que cette théorie des quanta de lumière explique l'effet photoélectrique. Une pluie de photons tombe sur une plaque métallique. L'action entre la radiation et la matière consiste ici en un très grand nombre de processus particuliers, où un photon frappe l'atome et en arrache un électron. Ces processus particuliers sont tous les mêmes, et l'[électron] arraché aura dans chaque cas la même énergie. ***Nous comprenons aussi qu'accroître l'intensité de la lumière c'est, dans notre nouveau langage, accroître le nombre de photons en chute. Dans ce cas, le nombre d'électrons arrachés à la plaque métallique serait plus élevé, mais l'énergie de chacun ne varierait pas.*** Nous voyons ainsi que cette théorie est en parfait accord avec l'observation.

Qu'arrivera-t-il si un rayon de lumière homogène d'une couleur différente, rouge, par exemple, au lieu de violette, frappe la surface métallique? Laissons l'expérience répondre à cette question. L'énergie des électrons arrachés doit être mesurée et comparée avec celle des électrons arrachés par la lumière violette. ***Il se trouve que l'énergie de l'électron arraché par la lumière rouge est plus petite que celle de l'électron arraché par la lumière violette.*** Cela signifie que l'énergie des quanta de lumière est différente pour les différentes couleurs. Les photons appartenant à la couleur rouge possèdent une énergie de moitié moins grande que celle des électrons appartenant à la couleur violette. Ou, plus exactement : l'énergie d'un quantum de lumière appartenant à une couleur homogène décroît proportionnellement à l'accroissement de la longueur d'onde. [...].

Continuons de négliger la théorie ondulatoire de la lumière et admettons que la structure de celle-ci soit granulaire et formée de quanta de lumière, c'est-à-dire de photons qui se déplacent dans l'espace avec la vitesse de 300 000 kilomètres par seconde. La lumière est ainsi, dans notre nouvelle image, une pluie de photons, et le photon est le quantum élémentaire d'énergie de lumière. Mais, si la théorie ondulatoire est écartée, le concept de longueur d'onde disparaît. Le concept qui le remplace est celui d'énergie de quanta de lumière. Les énoncés exprimés en termes de la théorie ondulatoire peuvent être traduits en termes de la théorie des quanta radiants.

Par exemple :

La lumière homogène a une longueur La lumière homogène contient des d'onde définie. photons d'une énergie définie.

La longueur d'onde du rouge du spectre L'énergie du photon du rouge du spectre est deux fois plus grande que celle du violet. est la moitié de celle du violet.

L'état des choses peut être résumé de la façon suivante : il y a des phénomènes qui peuvent être expliqués par la théorie des quanta, mais non par la théorie ondulatoire. L'effet photoélectrique en fournit un exemple, mais on connaît d'autres faits de ce genre. Il y a, d'autre part, des phénomènes qui peuvent être expliqués par la théorie ondulatoire, mais non par celle des quanta. L'infléchissement de la lumière autour d'obstacles en est un exemple typique. Il y a, enfin, des phénomènes, tels que celui de la propagation rectiligne de la lumière, qui peuvent être également bien expliqués par l'une et l'autre théorie.

Mais la lumière, qu'est-elle réellement? Est-elle une onde ou une pluie de photons ? Nous avons déjà posé une question semblable : la lumière est-elle une onde ou une pluie de corpuscules lumineux ? À ce moment, nous avons de bonnes raisons pour écarter la théorie corpusculaire de la lumière et accepter la théorie ondulatoire, qui embrassait tous les phénomènes. Maintenant, le problème est beaucoup plus compliqué. Il ne paraît pas probable qu'on puisse faire une description cohérente des phénomènes de la lumière en employant uniquement l'un des deux langages possibles. Parfois nous sommes obligés de nous servir de l'une de ces théories, parfois de l'autre, et nous pouvons, par moments, employer les deux à la fois. Nous nous trouvons en face d'une difficulté d'un genre nouveau. Nous avons deux images contradictoires de la réalité ; aucune, prise séparément, n'explique pleinement les phénomènes de la lumière, mais ensemble elles arrivent à le faire. »

Document 6 :

Retard de l'émission photoélectrique et difficulté de la modélisation ondulatoire

Selon le modèle ondulatoire, une lumière monochromatique est caractérisée par une amplitude A et sa fréquence ν telle que :

$$\psi = A \cdot \cos(2\pi\nu t + \varphi)$$

L'énergie qu'elle transporte augmente avec l'amplitude puisque proportionnelle à l'intensité (I proportionnelle à A^2)

Prenons un exemple : une feuille de Potassium est placée à $d = 1 \text{ m}$ d'une source lumineuse dont la puissance est de $\mathcal{P}_0 = 1 \text{ W}$.

Dans le cadre du modèle ondulatoire de la lumière, on suppose que l'énergie de la lumière est uniformément répartie sur le front d'onde et que la source émet dans toutes les directions. En faisant l'hypothèse que l'électron éjecté par effet photoélectrique recueille son énergie dans un cercle de rayon $r = 1 \text{ rayon atomique} = 10^{-10} \text{ m}$, la puissance incidente sur l'atome est :

$$\mathcal{P} = \mathcal{P}_0 \frac{\pi r^2}{4\pi d^2} = \mathcal{P}_0 \left(\frac{r}{2d}\right)^2$$

Sachant que l'énergie d'extraction d'un électron du potassium est de 2,1 eV environ ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$), le temps nécessaire à l'électron pour absorber suffisamment d'énergie pour être émis est de l'ordre de 2 minutes.

Problème : en réalité, l'émission photoélectrique est quasi-instantanée – durée de l'ordre de la nanoseconde !

Document 7 : Travail de sortie

On donne le tableau des valeurs du travail de sortie pour quelques éléments :

| | | | | | | | | |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Éléments | <i>Cs</i> | <i>Rb</i> | <i>K</i> | <i>Na</i> | <i>Li</i> | <i>Ca</i> | <i>Ta</i> | <i>Ag</i> |
| W_s (eV) | 2,14 | 2,16 | 2,30 | 2,75 | 2,90 | 2,87 | 4,25 | 4,26 |
| Éléments | <i>Al</i> | <i>Zn</i> | <i>Cr</i> | <i>W</i> | <i>Mo</i> | <i>Cu</i> | <i>Ni</i> | <i>Pt</i> |
| W_s (eV) | 4,28 | 4,33 | 4,50 | 4,55 | 4,60 | 4,65 | 5,15 | 5,65 |

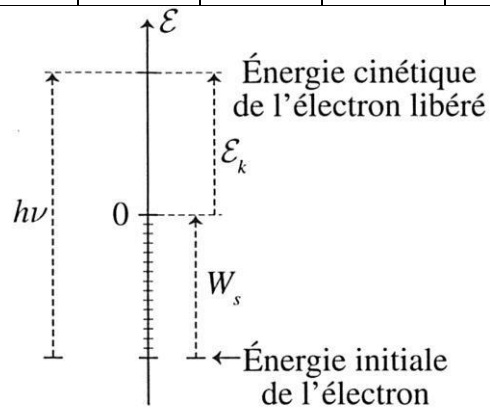


Figure 3 Interprétation de l'effet photoélectrique à l'aide d'un diagramme énergétique

Document 9 : Louis de Broglie (1924)

■ **Source** : Louis de Broglie, *Recherche sur la théorie des quanta*, dans *Annales de Physique*, 10^e série, t. III, janvier-février 1925, p. 28-30 :

L'étude de l'effet photoélectrique souleva une nouvelle énigme. On nomme effet photoélectrique l'expulsion par la matière d'électrons en mouvement sous l'influence d'un rayonnement. L'expérience montre, fait paradoxal, que l'énergie des électrons expulsés dépend de la fréquence du rayonnement excitateur et non de son intensité. M. Einstein, en 1905, a rendu compte de cet étrange phénomène en admettant que la radiation peut être absorbée uniquement par quanta $h\nu$; dès lors, si l'électron absorbe l'énergie $h\nu$ et s'il doit pour sortir de la matière dépenser un travail w son énergie cinétique finale sera $h\nu - w$. Cette loi s'est trouvée bien vérifiée. Avec sa profonde intuition, M. Einstein sentit qu'il y avait lieu de revenir en quelque manière à la conception corpusculaire de la lumière et émit l'hypothèse que toute radiation de fréquence ν est divisée en atomes d'énergie de valeur $h\nu$. Cette hypothèse des quanta de lumière (licht quanten) en opposition avec tous les faits de l'Optique ondulatoire fut jugée trop simpliste et repoussée par la plupart des physiciens. Tandis que MM. Lorentz, Jeans et d'autres lui faisaient de redoutables objections. M. Einstein ripostait en montrant comment l'étude des fluctuations dans le rayonnement noir conduisait aussi à la conception d'une discontinuité de l'énergie radiante. Le congrès international de physique tenu à Bruxelles en 1911 sous les auspices de M. Solvay se consacra entièrement à la question des quanta et c'est à la suite de ce congrès qu'Henri Poincaré publia peu de temps avant sa mort une série d'articles sur les quanta, montrant la nécessité d'accepter les idées de Planck.

En 1913, parut la théorie de l'atome de M. Niels Bohr. Il

On sait quelle a été la magnifique fortune de la théorie de Bohr depuis dix ans. Elle a tout de suite permis la prévision des séries spectrales de l'hydrogène et de l'hélium ionisé :

de son application. MM. Sommerfeld, Epstein, Schwarzschild, Bohr lui-même et d'autres ont perfectionné la théorie, énoncé des conditions de quantification plus générales, expliqué les effets Stark et Zeemann, interprété les spectres optiques dans leurs détails, etc. Mais la signification profonde des quanta est restée inconnue. L'étude de l'effet photoélectrique des rayons X par M. Maurice de Broglie, celle de l'effet photoélectrique des rayons γ due à MM. Rutherford et Ellis ont de plus en plus accentué le caractère corpusculaire de ces radiations, le quantum d'énergie $h\nu$ semblant chaque jour davantage constituer un véritable atome de lumière. Mais les objections anciennes contre cette vue subsistaient et, même dans le domaine des rayons X, la théorie des ondulacions remportait de beaux succès : prévision des phénomènes d'interférence de Laue et des phénomènes de diffusion (travaux de Debye, de W.-L. Bragg, etc.). Cependant, tout récemment, la diffusion à son tour a été soumise au point de vue corpusculaire par M. H.-A. Compton : ses travaux théoriques et expérimentaux ont montré qu'un électron diffusant une radiation doit subir une certaine impulsion comme dans un choc ; naturellement l'énergie du quantum de radiation s'en trouve diminuée et, par suite, la radiation diffusée présente une fréquence variable suivant la direction de diffusion et plus faible que la fréquence de la radiation incidente.