L'effet photoélectrique de la découverte à l'interprétation

Jean-Claude Boudenot,
Thales Research & Technology
Professeur à l'ISEP

L'effet photoélectrique a été découvert par Hertz lors de ses recherches sur les ondes électromagnétiques. Alors que la mise en évidence de ces dernières a validé de façon éclatante la théorie de Maxwell, l'effet photoélectrique était rebelle à toute interprétation maxwellienne. Tandis que les ondes électromagnétiques contenaient les germes de la relativité restreinte, l'effet photoélectrique contenait ceux de la mécanique quantique ! Ce sont également les travaux sur l'effet photoélectrique qui ont mené Édouard Branly à sa découverte de la radioconduction. Cet effet a donc ouvert une page particulièrement riche de l'histoire de la physique.

Introduction

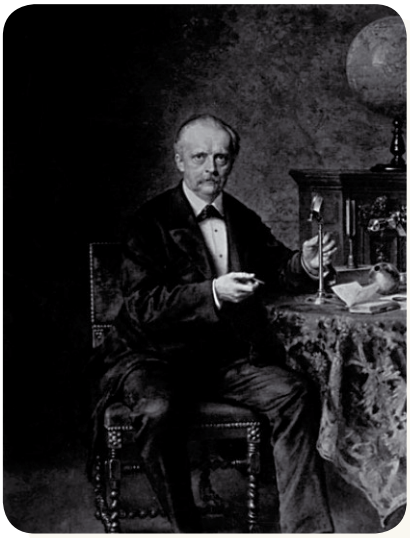
On peut légitimement se demander pourquoi il est question, en 2005, dans la revue Signaux, de la découverte de l'effet photoélectrique et de son interprétation. Il y a à cela plusieurs raisons. 2005 a été déclarée par l'UNESCO année mondiale de la physique pour promouvoir la physique et pour célébrer le centenaire de l'année miraculeuse d'Einstein. En 1905 ce dernier a en effet publié cinq articles qui ont changé notre façon de voir le monde. Mais l'article qu'il juge lui-même « le plus révolutionnaire » est celui qu'il consacre à l'interprétation de l'effet photoélectrique, c'est d'ailleurs celui qui lui vaudra, en 1922 (au titre de 1921), le prix Nobel de physique. Cette année 2005 marque également les 50 ans de la disparition d'Einstein (mort le 18 avril 1955) et les 50 ans de la naissance de l'ISEP. Simple coïncidence ? Oui, bien sûr, mais en 1955 on parle de l'Institut Supérieur d'Électronique de Paris, École Branly. La nouvelle École est fondée à l'emplacement même où Édouard Branly avait son laboratoire, au sein de l'Institut Catholique de Paris, là même où notre savant a fait toutes ses recherches. C'est dans ces lieux que Branly a découvert la radioconduction qui a conduit au formidable développement de la TSF puis de la radio. La découverte de cet « effet Branly », que l'on présenterait aujourd'hui comme étant une « conduction électrique assistée par rayonnement », est la conséquence des recherches qu'il a menées sur l'effet photoélectrique ! Ainsi, si l'on dessinait l'arbre de la découverte faite par Hertz en 1887, on verrait apparaître deux magnifiques branches : l'interprétation « révolutionnaire » d'Einstein (17 mars 1905) et la découverte de l'effet Branly (24 novembre 1890). Laissons-nous entraîner dans l'escalade de cet arbre photoélectrique !

La découverte fortuite de l'effet photoélectrique

Heinrich Hertz, jeune professeur de physique expérimentale

Nous sommes au début de l'année 1885 à Karlsruhe. Un brillant jeune homme de 28 ans arrive à l'université de cette ville où il vient d'être nommé professeur de physique expérimentale, il s'appelle Heinrich Hertz. Son prédécesseur, Ferdinand Braun, lui laisse un laboratoire bien équipé. Le jeune professeur a une formation solide. Après des études d'ingénieur architecte à l'université de Francfort et un passage à l'Institut polytechnique de Dresde, Hertz s'oriente vers les sciences de la nature qu'il étudie d'abord à Munich puis à Berlin. Cette ville n'est pas seulement la capitale de la Prusse, c'est également à cette époque la capitale mondiale de la physique. Hertz, qui a pour professeur deux grands physiciens Kirchhoff et Helmholtz, devient en 1880, après l'obtention de son doctorat de physique, l'assistant de ce dernier. C'est donc Helmholtz qui lui donne ses premiers sujets

de recherche. Hertz obtient en 1883 un poste de Maître de conférence à l'université de Kiel, mais ne disposant pas de laboratoire, il va se consacrer à des études théoriques



Helmholtz

portant sur la théorie électrodynamique de son maître Helmholtz. Hertz est un théoricien remarquable mais l'expérimentation lui manque, le poste à Karlsruhe le comble de joie. Il va pouvoir se consacrer à une étude suggérée par son ancien professeur : déterminer l'action électrodynamique des courants dans les isolants. Hertz connaît aussi naturellement les travaux que Maxwell a réalisés en électromagnétisme entre 1855 et 1868 et synthétisés dans son remarquable ouvrage de 1873 intitulé *Treatise on electricity and magnetism*. Dès 1864, Maxwell indique que l'on ne peut « guère éviter d'inférer que la lumière n'est autre que les ondulations transverses du même milieu qui est la cause des phénomènes électriques et mécaniques ».

Hertz se demande s'il serait possible de produire ces « ondulations transverses ». S'il s'agissait d'ondes acoustiques, il suffirait d'utiliser un diapason. En frappant sur l'une de ses tiges, une vibration mécanique se produit qui met à son tour en mouvement l'air avoisinant et ce sont ces vibrations qui sont perceptibles par l'oreille. Hertz sait cela d'autant mieux que son ancien mentor, Helmholtz, est l'un des maîtres en acoustique physique et physiologique. La grande différence porte sur la fréquence, le *la* du diapason correspond à 440 vibrations par seconde (440 Hertz !), mais un circuit électrique susceptible d'émettre une onde électromagnétique doit osciller à une centaine de millions de vibrations par seconde ! Hertz se dit alors qu'il faudrait constituer une sorte de *diapason électrique*. Il décrit lui-même son dispositif de la façon suivante : « La disposition envisagée constitue une sorte de *diapason électrique*. La théorie conduit d'une manière parfaitement sûre à cette conception et elle permet en outre d'évaluer avec une certaine approximation la durée d'oscillation de ce diapason à un cent millionième de seconde ». Son dispositif est formé d'un fil de cuivre terminé à chaque extrémité par une sphère métallique, et coupé en son milieu par deux petites boules en laiton séparées entre elles d'un écart très faible et réglable (cette partie constitue *l'éclateur*). Cette tige est connectée à une bobine de Ruhmkorff dont les décharges produisent des courants qui oscillent rapidement d'une extrémité à l'autre du circuit[1]. Après quelques va-et-vient, une étincelle éclate entre les deux boules. Ce diapason électrique constitue le circuit primaire de Hertz, encore appelé excitateur, ou émetteur puisque c'est lui qui produit les ondes. Hertz commente son image de diapason : « Pour qu'un semblable diapason vibre, il faut que l'action excitatrice se produise ou cesse d'une manière suffisamment instantanée, c'est-à-dire dans un temps qui soit du même ordre que la durée d'oscillation. Il n'est pas possible de réaliser des changements aussi brusques par des procédés mécaniques, mais l'étincelle électrique sous la forme spéciale que nous avons décrite nous en donne le moyen ».

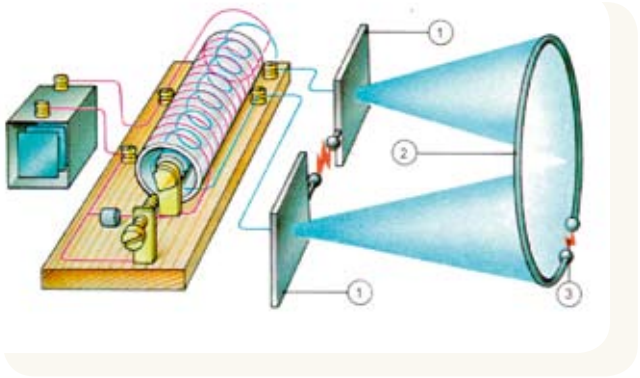
La détection de l'onde se fait par un circuit *secondaire*, formé d'un simple fil de cuivre en forme de cercle ou de carré, coupé lui aussi par deux petites boules métalliques formant un *éclateur*. Ce circuit secondaire est également appelé *résonateur* car il résonne avec le primaire. Le 13 novembre 1886, Hertz note dans son journal que des courants induits dans le circuit primaire apparaissent dans le circuit secondaire. Même si pour l'instant les deux circuits ne sont séparés que d'un mètre cinquante, les étincelles du secondaire sont extrêmement faibles. La longueur des étincelles est inférieure au millimètre, elle peut même descendre au centième de millimètre. Ces minuscules étincelles ne peuvent être vues que dans l'obscurité, parfois même à l'aide d'une loupe, mais

[1] Le calcul de la période de ce diapason électrique est très simple. D'après la théorie de William Thomson (futur Lord Kelvin) elle est égale à $f=1/2\pi$ LC où C étant la capacité des deux sphères placées à grande distance l'une de l'autre et L la self-induction du fil de cuivre qui relie ces deux sphères.

heureusement leur grésillement caractéristique permet de déceler leur présence à l'oreille. Hertz indique lui-même que « les étincelles sont microscopiques, à peine longues d'un centième de millimètre, leur durée est inférieure à un millionième de seconde. Il paraît impossible, presque inconcevable, qu'elles soient visibles, et pourtant elles le sont, dans une chambre obscure et pour un œil reposé ». En expérimentateur minutieux, Hertz refait plusieurs fois l'expérience et du 25 au 27 janvier 1887, pour mieux voir les étincelles il enferme l'éclateur du secondaire dans une boite. À sa surprise il constate qu'en faisant cela, les étincelles s'affaiblissent de façon nette. Hertz rend compte de son constat : « Dans une série d'expérience sur les effets de résonance entre des oscillations électriques très rapides, deux étincelles électriques sont produites simultanément par une bobine d'induction. L'étincelle A est celle du primaire, l'étincelle B celle du secondaire. J'ai enfermé l'étincelle B dans un compartiment obscur de façon à faire les observations plus facilement, j'ai alors constaté que la longueur maximum de cette étincelle diminuait ». Il comprend que quelque chose de nouveau se produit et décide d'interrompre ses explorations antérieures pour se consacrer à l'étude du nouveau phénomène.

La découverte de l'effet photoélectrique

Au printemps et à l'été 1887, Hertz montre que ce sont les rayons ultraviolets présents dans les étincelles du primaire qui sont l'origine du phénomène observé. Pour cela il utilise un spectroscope constitué d'une source lumineuse (une étincelle ou un arc) et d'un élément dispersif permettant de sélectionner la longueur d'onde du rayonnement incident. Le rayonnement de longueur d'onde choisie est envoyé sur le circuit secondaire après avoir traversé un milieu qui absorbe plus ou moins les rayons UV. Hertz interpose successivement entre la source de rayonnement et le secondaire : du quartz ; du gaz de houille ; une mince plaque de mica ; du verre. Il trouve que le quartz (qui est transparent aux rayons ultraviolets) n'affecte pas le phénomène tandis que le verre et le mica, et dans une moindre mesure le gaz de houille, sont « opaques au rayonnement à l'origine du phénomène observé » (c'est-à-dire aux UV). En juillet 1887, Hertz fait part de ses résultats à la communauté scientifique en publiant un article intitulé : « Sur un effet de la lumière ultraviolette sur les décharges électriques ». Il précise dans cet article qu'il se « borne à présent à communiquer les résultats obtenus, sans essayer de bâtir une théorie expliquant l'origine des phénomènes observés ». Ce que Hertz vient de découvrir c'est « l'effet photoélectrique ».



Principe de l'expérience de Hertz pour la production et la détection des ondes électromagnétiques :
1 = circuit primaire (« diapason électrique ») ;
2 = circuit secondaire (« résonateur ») ;
3 = étincelle au secondaire éclatant au passage de l'onde

Hertz reprend alors le fil de ses recherches. En mars 1888 il peut fièrement annoncer à son maître Helmholtz : « Les ondes électrodynamiques dans l'air se réfléchissent sur les parois conductrices et, à angle d'incidence nul, les ondes réfléchies interfèrent avec les ondes incidentes et génèrent des ondes stationnaires dans l'air. Sur les premières longueurs d'ondes comptées à partir de la paroi, les indices sont très clairs et nombreux, et je crois que la nature ondulatoire du son dans l'espace libre ne saute pas aussi clairement aux yeux que celle de cette propagation électrodynamique. » Il rédige un article où il relate ses expériences, qu'il transmet à l'éditeur le 1er avril 1888 : « Ces expériences, écrit Hertz, montrent la propagation de l'induction sous forme d'ondes à travers l'air sous une forme visible et presque tangible ». De plus il peut vérifier directement la vitesse de propagation qui coïncide avec celle de la lumière, comme prévu par la théorie de Maxwell. Finalement la production d'ondes électromagnétiques sera annoncée par Hertz en juin 1888 dans les *Compte Rendus de l'Académie de Berlin*.

Recherches expérimentales sur l'effet photoélectrique

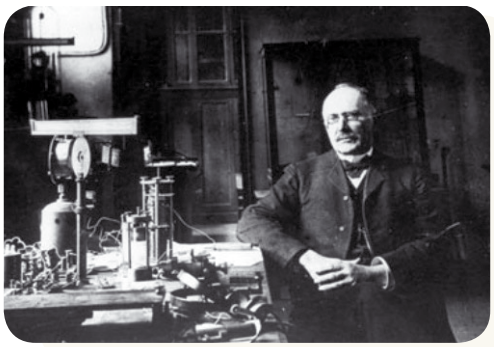
Les travaux de Wilhelm Hallwachs

L'étude de cet effet photoélectrique va être poursuivie par Hallwachs. Wilhelm Hallwachs (1859-1922) est un physicien allemand qui enseignera une grande partie de sa vie à Dresde, d'abord comme professeur d'électrotechnique (1893), puis comme professeur de physique à la « Technische Hochshule ». Après son doctorat, il est l'assistant de Kundt, puis de Kohlrauch et s'intéresse, à partir de 1888, à la découverte de Hertz. Il écrit alors : « Dans un article récent, Hertz a décrit ses recherches sur la longueur maximum d'une étincelle produite par induction sur le rayonnement reçu par elle de la part

d'une autre étincelle. Il a montré que les phénomènes observés sont dus à l'action du rayonnement UV. À cause des conditions complexes des recherches à mettre en œuvre, aucune autre information sur l'origine de ce phénomène n'a pu être dégagée. Je me suis efforcé d'étudier ces phénomènes dans des conditions plus simples afin de trouver plus facilement les causes qui en sont à l'origine. L'étude de l'action de la lumière sur des corps électriquement chargés a permis de clarifier la situation ». Hallwachs montre que les feuilles d'un électroscope chargées négativement se rapprochent rapidement lorsqu'elles sont éclairées par de la lumière ultraviolette, phénomène qui ne se produit pas lorsque les feuilles de l'électroscope sont chargées positivement. Par ailleurs il fait une autre remarque importante : « Il me semble très probable que le phénomène a lieu à la surface du métal et qu'il résulte en quelque sorte de la séparation des charges électriques. » La même année (1888), Righi et Soletov constatent de leur côté que l'effet ne cesse pas même lorsque l'on conduit l'expérience dans un vide poussé. D'autres expériences sont réalisées par Elster et Geitel entre 1889 et 1895, ils étudient en particulier « l'influence d'un champ magnétique sur les décharges photoélectriques dans un gaz raréfié » et classent les métaux selon leur sensibilité à l'effet photoélectrique. Ils montrent en particulier que l'effet photoélectrique peut se produire avec de la lumière visible sur les métaux alcalins, tandis que pour les autres métaux la lumière ultraviolette est nécessaire.

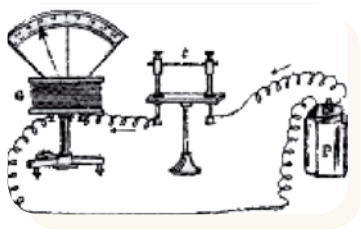
Branly étudie l'influence de la lumière sur la conduction électrique

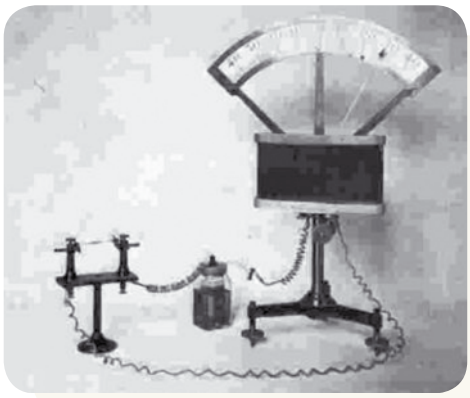
En 1888-1889, Branly fait des études sur la conductivité de toutes sortes de substances, en particulier des verres platinés et argentés. Son intérêt pour les phénomènes de conduction de l'électricité le conduit à s'intéresser aux travaux de Hallwachs sur l'action des rayonnements ultraviolets. Il présente ses travaux le 8 avril 1890 dans une note à l'Académie des sciences relative à : *La déperdition des deux électricités par des radiations très réfrangibles* [les rayons ultraviolets]. « Dans l'étude de l'action des radiations très réfrangibles sur les conducteurs électrisés, écrit Branly, l'arc voltaïque a été le plus souvent utilisé comme source de lumière, et c'est à son usage que se rapporte les phénomènes que MM. Hallwachs, Righi, Soletov, ont fait connaître. L'emploi d'une source lumineuse plus riche en rayons très réfrangibles m'a conduit à des résultats nouveaux... » D'une part sa source est plus riche en ultraviolet, d'autre part il étudie toutes sortes de configurations. Dans l'une d'elle il analyse la déperdition d'un disque métallique. Puis il met deux de ces disques l'un en face de l'autre, à une distance d'environ 1 mm, chacun des disques étant relié à l'un des pôles d'une pile (il réalise de la sorte un condensateur). Lorsque l'éclat de l'étincelle illumine l'un des disques il constate que « l'intervalle des deux plateaux est traversé par un courant ». Branly cesse alors de s'intéresser à la décharge du disque au profit du courant qui passe entre



Édouard Branly dans son laboratoire

les deux plateaux sous l'influence de l'étincelle. Il utilise à présent un circuit qui va le mener à sa découverte. Ce circuit est constitué d'une pile, du conducteur à étudier (ici les deux disques) et d'un galvanomètre qui permet de lire le courant qui passe dans le dispositif. Puisque le courant passe entre les deux disques suite à l'éclairement de l'un deux, c'est que l'air, normalement isolant, devient soudainement conducteur. Branly va alors rechercher de façon systématique quels sont les matériaux qui acquièrent la propriété de voir chuter brutalement leur résistance quand ils sont soumis au rayonnement produit par une étincelle. Il utilise en particulier une « plaque d'ébonite cuivrée » et « un tube à limaille métallique ». Branly multiplie les expériences, consigne minutieusement les résultats observés dans ses cahiers de laboratoire, on peut y lire par exemple : « la résistance passe de 2 millions d'ohms avant l'étincelle à moins de 2... » Branly constate qu'en éloignant la source de lumière de son dispositif l'effet se produit encore. Le 20 novembre son préparateur, Gendron, indique « qu'il place un bout de carton devant la longue étincelle lumineuse de la machine et constate sur le galvanomètre que le courant passe toujours. Ainsi ce n'est pas la lumière, violette ou non, qui rend la matière conductrice, ce sont les ondes électriques. » Il s'agit de l'élément clef de la découverte. Pourquoi avoir placé un « bout de carton » entre l'étincelle et le dispositif récepteur ? Sans doute parce que Branly a l'habitude de faire varier de façon systématique les conditions de ses expériences. Ici il s'agissait de montrer que l'origine supposée du phénomène est due au rayonnement ultraviolet et à lui seul. D'où l'interposition de différents écrans (lames de quartz, plaques de verre, etc.) entre « l'émetteur » et le « récepteur », comme d'ailleurs Hertz l'avait également fait. Alors pourquoi du carton qui ne laisse passer ni les UV, ni le visible ni l'infrarouge ?





Dispositif utilisé par Branly constitué d'une pile, d'un tube à limaille et d'un galvanomètre

Peut-être parce que pour Branly l'action avait pour origine *l'étincelle* et qu'il n'y avait pas raison d'écarter a priori une source d'émission, autre qu'ultraviolette, produite par cette étincelle.

La découverte de Branly

Branly constate, toujours en ce 20 novembre 1890, que : « la poudre de zinc est très sensible à l'étincelle de la machine de Wimshurt qui est placée à plus de 10 mètres. La déviation de l'aiguille du galvanomètre est supprimée par tapotement sur la table ». De tous les dispositifs étudiés c'est le « tube à limaille » qui se montre le plus sensible. Celui-ci est constitué d'un simple tube en verre de la taille d'un crayon. Il est rempli d'une limaille métallique (zinc, fer, aluminium, cuivre ou autre) et deux tiges métalliques ferment ses extrémités, tassent modérément la limaille et assurent le contact électrique avec cette dernière.

Poursuivons le récit de la découverte : « M. Branly, relate son préparateur Gendron, fait transporter la machine de Wimshurst dans l'amphithéâtre de physique. La machine se trouve à plus de vingt mètres du tube de limaille et du galvanomètre et en est séparée par quatre murs épais et par la cour... » Édouard Branly est près du galvanomètre. Par la fenêtre, il fait signe à Gendron d'actionner l'éclateur, puis il revient à sa table, fixe un regard anxieux sur l'aiguille... elle bouge. Un petit choc sur le tube et l'aiguille reprend sa position initiale, le courant ne circule plus dans le galvanomètre. « Toutes les fois que je fais éclater une étincelle, dit Gendron, l'aiguille du galvanomètre de M. Branly, à vingt mètres de moi, entre en mouvement. Je peux ainsi envoyer des signaux à M. Branly. En effet, chaque fois qu'il constate un mouvement de l'aiguille, il ébranle par un choc le tube à limaille et l'aiguille du galvanomètre revient à zéro. Elle recommence à se déplacer lorsque se produit une nouvelle étincelle ».

Dans sa communication à l'Académie des Sciences du 24 novembre 1890, Branly résume les points essentiels : « J'ai employé comme conducteurs de fines limailles métalliques de fer, aluminium, antimoine, cadmium, zinc, bismuth, etc. La limaille est versée dans un tube de verre ou d'ébonite, où elle est comprise entre deux tiges métalliques. Si l'on ferme un circuit comprenant un élément Daniell, un galvanomètre à long fil et un tube à limaille, il ne passe le plus souvent qu'un courant insignifiant, mais il y a une brusque diminution de résistance accusée par une forte déviation du galvanomètre quand on vient à produire dans le voisinage du circuit une ou plusieurs décharges électriques. Je fais usage, à cet effet, soit d'une petite machine de Wimshurst, avec ou sans condensateur, soit d'une bobine de Ruhmkorff. L'action s'observe très aisément et sans aucune précaution spéciale, à quelques mètres de distance. En faisant usage du pont de Wheatstone, j'ai pu constater cette action à plus de vingt mètres (en ligne directe) alors que l'appareil à étincelles fonctionnait dans une salle séparée du circuit dans lequel avait été inséré le tube à limaille, par trois grandes pièces et que le bruit des étincelles ne pouvait être perçu. Les variations de résistance demeurèrent considérables, par exemple, de plusieurs millions d'ohms au repos, elles n'accusaient plus que *deux mille* et bien souvent cent ohms après l'éclatement de l'étincelle. L'observation de la déviation d'un galvanomètre présentait cet avantage qu'elle permettait d'obtenir, par substitution, la mesure de la variation de résistance du tube à limailles, ainsi je réalisais, à distance, la production brusque d'un effet quelconque du courant. Dans ces diverses expériences, le tube à limailles *ferme un courant à distance*, sans aucun fil intermédiaire. »

Retour à l'effet photoélectrique, les travaux de Lenard

L'étape suivante est l'œuvre du physicien allemand Lenard. Philipp Lenard (1862-1947) est l'élève de Bunsen et Helmholtz et passe son doctorat en 1886 à Heidelberg. Il étudie les rayons cathodiques à partir de 1888 et devient l'assistant de Hertz en 1892 à Bonn. Il commence ses travaux sur l'effet photoélectrique à partir de 1899 dans la suite logique de ceux qu'il a réalisés sur les rayons cathodiques et qui seront récompensés par l'attribution du prix Nobel de physique en 1905. Les rayons cathodiques sont, dans la dernière décennie du XIX^{e} siècle, l'objet

de nombreux travaux, admirablement résumés par Jean Perrin (30 décembre 1895) : « Les uns, avec Goldstein, Hertz ou Lenard, pensent que ce phénomène est dû, comme la lumière, à des vibrations de l'éther ou même, que c'est une lumière à courte longueur d'onde. On conçoit bien alors que ces rayons aient une trajectoire rectiligne, excitent la phosphorescence et impressionnent les plaques photographiques. D'autres, avec Crookes ou J.J. Thomson, pensent que ces rayons sont formés par de la matière chargée négativement avec une grande vitesse. Et l'on conçoit alors très bien leurs propriétés mécaniques, ainsi que la façon dont ils s'incurvent dans un champ magnétique. Cette dernière hypothèse m'a suggéré quelques expériences.» Les expériences de Jean Perrin seront à l'origine de la découverte de l'électron (J.J. Thomson, 1897). Lenard étudie avec Hertz les rayons cathodiques et met au point lors de ses recherches un appareillage qui va se révéler très efficace pour l'analyse de l'effet photoélectrique découvert par son maître.

Entre 1899 et 1902, en utilisant des tubes ayant un vide poussé, il fait toute une série d'observation :

- Les UV arrachent des particules d'électricité négative aux métaux
- Ces particules d'électricité négative (« électrons ») ont le même rapport charge / masse (e/m) que les « rayons cathodiques »
- Le nombre d'électrons arrachés est proportionnel à l'intensité lumineuse
- L'énergie cinétique des électrons est indépendante de l'intensité lumineuse
- L'énergie cinétique des électrons augmente quand la fréquence de la lumière incidente augmente (effet à seuil)

En conclusion, l'énergie cinétique des électrons ne dépend que de la longueur d'onde de la lumière incidente. Le seuil de l'effet photoélectrique ne dépend que de la fréquence de la lumière incidente et non de son intensité. Ce résultat est inexplicable dans le cadre de la théorie électromagnétique de Maxwell, dont les prédictions ont pourtant été si brillamment vérifiées par Hertz avec les ondes électromagnétiques.

L'interprétation de l'effet photoélectrique

Le 28 mai 1901, Einstein prend connaissance des travaux de Lenard et écrit à sa fiancée, Mileva Maric : « Je viens juste de lire un article formidable de Lenard sur la production de rayons cathodiques par la lumière ultraviolette. Ce morceau de choix m'a fait une telle impression, il me met dans un tel bonheur et une telle joie qu'il faut absolument que je t'en fasse profiter ». Einstein qui se passionne pour la physique statistique, s'intéresse à de nombreux sujets (capillarité, mouvement brownien, corps noir, etc.) qui vont lui permettre de converger vers une interprétation aussi révolutionnaire qu'élégante.

Einstein publie en 1905 un article intitulé « Sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière »[2]. Il y explique que la lumière pourrait être un corpuscule : « On doit cependant garder à l'esprit que les observations optiques se réfèrent à des moyennes temporelles plutôt qu'à des valeurs instantanées [...]. En dépit des succès de la conception ondulatoire il est concevable que la théorie de la lumière qui opère avec des fonctions spatiales continues puisse conduire à des contradictions avec l'expérience quand elle est appliquée à des phénomènes d'émission ou de transformation de la lumière [...]. Si l'entropie d'un rayonnement monochromatique dépend du volume de la même façon que si le rayonnement était un milieu discontinu consistant en quanta d'énergie de grandeur $h\nu$ l'étape suivante qui s'impose est de rechercher si les lois de l'émission et de la transformation de la lumière sont aussi telles qu'elles peuvent être interprétées ou expliquées en considérant que la lumière consiste en de tels quanta d'énergie ». En supposant que la lumière est constituée de grains d'énergie, Einstein écrit tout simplement que cette énergie ($h\nu$) permet d'extraire un électron de l'atome (en lui communiquant une énergie qui est égale à son énergie de liaison) le reste étant emporté par l'électron sous forme d'énergie cinétique. Cette interprétation, à la fois extrêmement simple et élégante, permet de retrouver les constats expérimentaux faits par Lenard. La relation $E = h\nu$ relie le caractère ondulatoire de la lumière (représenté par sa fréquence ν) à son caractère corpusculaire (représenté par le grain d'énergie E). C'est la constante de Planck qui fait le lien entre ces deux mondes (ondulatoire et corpusculaire), le fait que cette constante ne soit pas nulle montre la dualité de la lumière (c'est à la fois une onde et un corpuscule). Einstein donne ainsi une interprétation physique à cette constante h, contrairement à Planck qui essaie à cette époque de la faire disparaître. Pour l'heure, Einstein est le seul physicien à croire à cette interprétation. Ce n'est que onze ans plus tard, en 1916, après des mesures très précises, que Millikan annonce « qu'Einstein avait prédit exactement les résultats observés ». Toutefois, même en 1916, Millikan pense que l'hypothèse des quanta de lumière est « une

[2] Cet article est transmis le 17 mars 1905 et publié en juin 1905.

hypothèse hardie pour ne pas dire téméraire », il écrira plus tard : « J'ai passé dix ans de ma vie à vérifier expérimentalement l'équation trouvée par Einstein en 1905, et contrairement à toutes mes prévisions, je fus contraint, en 1915, d'affirmer que sa confirmation était indiscutable en dépit de son caractère déraisonnable, car elle semblait contredire tout ce que nous savions sur les interférences lumineuses ». Einstein recevra le prix Nobel de physique en 1922 « pour ses mérites en physique mathématique, spécialement pour sa découverte de la loi de l'effet photoélectrique ».

Jean-Claude BOUDENOT
Ingénieur Civil des Mines, Ingénieur en Génie Atomique et Agrégé de Physique.

Jean-Claude Boudenot est, au sein de Thales Research & Technology, responsable de la Plateforme consacrée aux micro et nano technologies. Cette Plateforme technologique commune fonctionne dans le cadre d'un accord avec le CNRS, l'École Polytechnique et l'Institut d'Optique. Jean-Claude Boudenot est par ailleurs responsable du département sciences fondamentales de l'ISEP. Il est l'auteur de plusieurs livres dont « L'histoire de la physique et des physiciens », « Max Planck et les quanta », « Comment Einstein a changé le monde », « Lorentz et la physique moderne », « Poincaré physicien », « Comment Branly a inventé la radio ». Jean-Claude BOUDENOT est membre émérite de la SEE.