

# La découverte des rayons X par Röntgen

par Jean-Jacques Samueli, docteur ès sciences physiques.

Wilhelm Conrad Röntgen est né le 27 mars 1845 à Lennep, en Allemagne (Westphalie). Il a étudié à Zurich puis est devenu professeur de physique à Strasbourg (1876-1879), à Giessen (1879-1888), Würzburg (1888-1900) et à Genève (1900-1920). Il a reçu le premier prix Nobel de physique en 1901 pour sa découverte des rayons X, faite fin 1895 alors qu'il faisait fonctionner un tube de Crookes dans l'obscurité.

## L'EXPÉRIENCE DE RÖNTGEN

Le 8 novembre 1895, Röntgen enveloppe d'un carton noir un tube de Crookes alimenté par une bobine de Ruhmkorff, c'est à dire par un transformateur élévateur excité par des impulsions électriques récurrentes. Il se se produit donc, à chaque impulsion, une décharge électrique dans le gaz à basse pression remplissant le tube. Ayant placé ce tube dans l'obscurité, Röntgen observe une fluorescence sur un écran en papier recouvert de platinocyanure de baryum. Ce corps présente la propriété d'être fluorescent, c'est à dire d'émettre de la lumière lorsqu'il est excité par des photons. Cette fluorescence apparaît lorsque le papier est disposé à une distance inférieure à deux mètres du tube, et cela, même lorsque ce papier est protégé par l'interposition d'un carton noir. Röntgen en conclut qu'une radiation invisible de nature inconnue, qu'il nomme rayonnement X, est produite par le tube et est la cause de la fluorescence observée.

### Le tube de Crookes

Sir William Crookes (1832-1919) avait inventé un dispositif expérimental appelé aujourd'hui tube de Crookes (ou tube à décharge, tube à gaz ou tube à cathode froide), afin d'étudier la fluorescence de minéraux.

Ce tube est simplement une ampoule de verre comportant deux électrodes à ses extrémités : une cathode métallique, en aluminium, et une anode, qui sert de cible aux électrons. On fait le vide dans le

tube mais il reste une pression d'air résiduelle de l'ordre de 100 Pa (environ un millième d'atmosphère).

Une bobine d'induction est utilisée pour fournir une haute tension électrique entre anode et cathode. Il se produit alors une ionisation de l'air résiduel contenu dans le tube. Comme dans une pile, les ions positifs ainsi créés sont attirés par la cathode, qu'ils heurtent en arrachant d'autres électrons au métal de la cathode, eux-mêmes attirés par l'anode : avant la découverte de l'électron, on appelait "rayons cathodiques" le flux d'électrons arrivant sur l'anode ou sur la cible servant d'anode (comme la croix de Malte ci-dessous).



**Figure 1 : Tube de Crookes** (alimenté par une bobine de Ruhmkorff, visible à droite). Grâce au vide poussé au sein du tube, les électrons rencontrent peu de molécules sur leur trajet et conservent la grande vitesse (de l'ordre de  $0,1c$ ) acquise grâce au champ électrique. Certains dépassent l'anode et provoquent une fluorescence du verre, accentuée lorsque le fond du tube est recouvert d'un matériau fluorescent. La projection de l'ombre de la croix de Malte amena Hittorf (1824-1914) à émettre l'hypothèse que quelque chose se déplaçait de manière rectiligne au sein du tube, ce qui sera baptisé « rayon cathodique ».

En 1895, Röntgen a cinquante ans, c'est un savant chevronné, très fin expérimentateur qui a déjà à son actif de nombreux travaux. Voici comment il retrace sa découverte<sup>1</sup> :

*Je m'intéressais déjà depuis longtemps aux rayons cathodiques, qui avaient été étudiés spécialement par Hertz et Lenard. ... [Je] me proposais, dès que j'en aurais le temps, de réaliser quelques travaux personnels... Je trouvais le temps pour cela à la fin d'octobre 1895. ... Je travaillais [le 8 novembre 1895 au soir] avec un tube de Hittorf-Crookes, lequel était entièrement entouré de papier noir. Un morceau de papier au platino-cyanure de baryum se trouvait à côté sur la table. J'envoyais un courant à travers le tube et remarquais, en travers du papier, une ligne noire, particulière. Il était exclu que la*

<sup>1</sup> Röntgen, Mc. Clure Magazine, 6 avril 1896.

*lumière puisse venir du tube car il était entièrement recouvert de papier, et ce dernier ne laissait passer aucune lumière... Je pensais qu'il s'agissait... de quelque chose de nouveau, mais encore inconnu.*

Il s'aperçoit que, si l'on interpose la main entre le tube et l'écran, on voit apparaître les os de la main. Le soir du 22 décembre 1895, il appelle sa femme pour venir voir sa découverte extraordinaire, lui demande d'interposer sa main et réalise la toute première radiographie X qui nous soit parvenue.



**Figure 2 :** *Radiographie aux rayons X de la main du médecin anatomiste Kölliker (1896)*

### **COMMENT RÖNTGEN FAIT CONNAÎTRE SES RÉSULTATS**

Dès le 28 décembre 1895, Röntgen fait sa première communication sur cette découverte : « Sur une nouvelle sorte de rayons » (texte *BibNum*). Il propose de les appeler "rayons X" : ces rayons étant d'origine inconnue, il les désigne par le nom de l'inconnue en mathématiques, X (note de bas de page 2) :

*Afin d'être bref, j'utiliserai le terme 'rayons', et pour les distinguer d'autres du même nom, je les appellerai 'rayons X'*

Le succès de la découverte est immédiat ; voici en quels termes Röntgen le retrace à son ancien assistant et ami Zehnder : " [...] mon travail a été reconnu partout. Boltzmann, Warburg, Kohlrausch et, (ce n'est pas le moindre) Lord Kelvin, Stokes, Poincaré et d'autres m'ont exprimé leur joie de cette découverte et leur considération [...] Je n'avais parlé de mon travail à personne. J'expliquais seulement à ma femme que je faisais quelque chose dont les gens diraient quand

ils seraient au courant "Röntgen est vraiment devenu fou !". Au premier janvier, j'ai posté les tirés à part et, après cela, quelle sarabande ! La *Wiener Presse* a été la première à emboucher les trompettes de la renommée, puis d'autres ont suivi. "

Le 23 janvier 1896, devant la Société physico-médicale de Würzburg (pour laquelle il avait écrit son texte du 28 décembre 1895), Röntgen fait une conférence, la seule qu'il donnera sur le sujet, à laquelle assiste le célèbre anatomiste Kölliker<sup>2</sup>. Au cours de cette conférence, il réalise une radiographie de la main de ce savant ; ce dernier propose alors d'appeler "rayons Röntgen" le nouveau rayonnement. Les travaux sur les rayons X se multiplient alors à une vitesse vertigineuse. Pour la seule Académie des sciences de Paris, deux notes y sont consacrées lors de la séance du 3 février, quatre pour celle du 10, six pour celle du 17, six également pour celle de 2 mars<sup>3</sup>. Au total, ce sont plus de mille articles qui seront publiés sur le sujet en 1896 dont cent huit à l'Académie des sciences française.

Le 5 mars 1896, Röntgen publie un second article portant le même titre que le premier (*Sur une nouvelle sorte de rayons*) qu'il présente ainsi : « Mon travail devant être interrompu pour quelques semaines, je me permets de communiquer, dès maintenant, quelques nouveaux résultats. [...] Mais j'ai attendu, pour publier mes expériences, d'être à même de communiquer des résultats irréfutables. » Il y relate de nombreuses expériences relatives à la décharge des corps par les rayons X. Le 13 mai 1897, il fait paraître une troisième et dernière publication sur sa découverte, elle est intitulée : *Nouvelles observations sur les propriétés des rayons X*. Il confirme, entre autre, que les rayons X prennent naissance au point du tube frappé par les rayons cathodiques et se répandent ensuite "dans toutes les directions".

### LE TEXTE DE DÉCEMBRE 1895 DE RÖNTGEN

<sup>2</sup> Rudolph Albert von Kölliker (1817-1905) est un médecin suisse qui a montré le lien entre les fibres nerveuses et les neurones et mis en évidence le fait que les chromosomes sont impliqués dans l'hérédité.

<sup>3</sup> C'est lors de la séance du 2 mars 1896 que Becquerel présente une note intitulée : *Sur les radiations invisibles émises par les corps phosphorescents*, dans laquelle il expose la découverte de la radioactivité (texte BibNum <http://www.bibnum.education.fr/physique/sur-les-radiations-invisibles-emises-par-les-corps-phosphorescents> )

Dans l'article que nous avons traduit, Röntgen tire diverses conclusions qu'il énumère dans des paragraphes numérotés 1 à 17. C'est une démarche scientifique de caractérisation d'un phénomène qu'il est intéressant de suivre :

§1 : Description du phénomène observé : Fluorescence induite à distance par une décharge dans un tube de Crookes.

*La fluorescence ainsi produite étant indépendante du fait que la surface enduite du papier est dirigée vers le tube à décharge. Cette fluorescence est visible même si l'écran de papier est distant de deux mètres de l'appareil.*

§2 : La fluorescence de l'écran distant est bien provoquée par un rayon inconnu en provenance du tube, et non par la lumière solaire (visible ou ultraviolette) voire artificielle (arc électrique) avec laquelle on avait l'habitude d'observer jusqu'alors la fluorescence :

*La propriété la plus étonnante de ce phénomène est le fait qu'un agent actif passe dans cette expérience au travers d'une enveloppe de carton noir, qui est opaque au rayonnement visible ou ultraviolet du soleil ou de l'arc électrique ; un agent qui a également la possibilité de produire une fluorescence active.*

§2 : C'est aussi dans ce paragraphe que Röntgen nomme cet effet :

*Afin d'être bref, j'utiliserai le terme 'rayon' [pour désigner 'l'agent' responsable des phénomènes observés] et pour les distinguer d'autres du même nom je les appellerai 'rayons X'.*

§2 : Ces rayons X passent à des degrés divers à travers la matière :

*Le papier est très transparent : derrière un livre relié d'environ 1000 pages j'observe un écran brillant (...) une plaque d'aluminium de quinze millimètres d'épaisseur, bien qu'affaiblissant sérieusement l'action, ne fit pas disparaître totalement la fluorescence (...) Si la main est interposée entre le tube à décharge et l'écran, l'ombre plus sombre des os est vue dans l'ombre légèrement marquée de la main elle-même.*

§3: L'absorption des rayons par les matériaux traversés est fonction de la densité de ces matériaux, mais à densité égale des différences existent.

§4 : L'absorption des rayons X par la matière croît avec l'épaisseur du matériau interposé.

§5 : Les métaux possèdent des transparences aux rayons X qui ne sont pas égales.

*Les différents métaux possèdent des transparences qui ne sont pas égales, même lorsque le produit de leur épaisseur par leur densité est le même.*

§6 : Les rayons X ne sont pas visibles par l'œil. Ils impressionnent les plaques photographiques.

*Les images photographiques peuvent être obtenues dans une pièce non obscure à l'aide de plaques photographiques dans leurs supports ou enveloppées de papier (...). Même si l'œil est approché près du tube à décharge, il n'observe rien.*

§7 : Les rayons X, à la différence des rayons lumineux, ne sont pas déviés par des prismes de différents matériaux, ni concentrés par des lentilles.

*Des expériences (...) dans un prisme en mica (...) ne montreront aucune déviation ni sur l'écran fluorescent ni sur des plaques photographiques.*

§8 : Aucune réflexion régulière des rayons X n'est détectable.

*La réflexion régulière n'a pas lieu, mais divers corps se comportent vis à vis des rayons X comme les milieux troubles vis à vis de la lumière.*

§9 : Il est possible que la structure interne d'un matériau influe sur sa transparence aux rayons X.

§10 : L'intensité des rayons X détectés varie avec l'inverse du carré de la distance à l'anode du tube émetteur ; les rayons X sont peu atténués par l'air, alors que les rayons cathodiques le sont.

*J'ai trouvé à partir de trois expériences, qui concordent très bien entre elles, que les intensités varient inversement avec le carré de la distance.*

*Il s'ensuit que l'air absorbe une bien plus faible fraction des rayons X que des rayons cathodiques. Ce résultat est en complet accord avec l'observation mentionnée plus haut (NB : §1), qu'il est encore possible de détecter une fluorescence à une distance de deux mètres du tube.*

§11 : Les rayons X ne sont pas défléchis par un champ magnétique, alors que les rayons cathodiques le sont.

*La possibilité de déflexion par un aimant a, jusqu'à présent, été la caractéristique des rayons cathodiques (...) Je n'ai pas réussi à obtenir une déflexion des rayons X par un aimant, même dans un champ intense.*

§12 : Les rayons X sont produits par les rayons cathodiques sur la paroi de verre du tube à décharge.

*L'endroit dont la fluorescence est la plus élevée sur la paroi du tube à décharge<sup>4</sup> peut être considéré comme le centre principal à partir duquel les rayons X rayonnent dans toutes les directions (...) Si les rayons cathodiques sont défléchis par un aimant à l'intérieur du tube, les rayons X proviennent alors d'un autre endroit, nouveau terminus des rayons cathodiques.*

§13 : Une tube de en aluminium – et non en verre – produit aussi des rayons X.

§14 : Le terme "rayon" est justifié par une propagation rectilinéaire.

---

<sup>4</sup> Röntgen parle ici de la fluorescence provoquée par les rayons cathodiques sur la paroi du tube de Crookes (cf. image 1, à droite), et non de celle provoquée par les rayons X sur un écran éloigné.

*Appeler « rayons » l'agent qui provient de la fenêtre d'un tube à décharge est justifié par le fait qu'une ombre peut être vue lorsque des corps plus ou moins transparents sont placés entre le tube et l'écran fluorescent.*

§15 : Des expériences d'interférences se sont révélées négatives.

§16 : Des expériences de déflexion par un champ électrique ne sont pas encore achevées.

§17 : Röntgen ignore la nature des rayons X mais propose l'hypothèse selon laquelle ils seraient des "vibrations longitudinales de l'éther."

*Pourquoi, donc, les nouveaux rayons ne pourraient-ils pas être liés aux vibrations longitudinales de l'éther ?*

### **DE NOS JOURS, L'EXPLICATION DU PHÉNOMÈNE D'APPARITION DES RAYONS X**

On l'a dit, Röntgen était avant tout un expérimentateur. Il ne participera pas à la caractérisation des rayons X en général, hors leur génération dans un tube de Crookes. Il cesse ses publications sur le sujet dès 1897, et ne cherche plus avant la nature des rayons qu'il a découverts. On peut se demander quelle est la raison de cette attitude. Max von Laue, qui montra en 1912 que les rayons X étaient des rayonnements électromagnétiques<sup>5</sup>, a écrit à ce sujet<sup>6</sup> : " On m'a fréquemment demandé les raisons qui avaient pu amener cet homme à se retirer à un tel point après sa découverte. [...] A mon avis, il avait été tellement écrasé par l'impression produite par la découverte qu'il fit, alors qu'il était âgé de cinquante ans, qu'il ne s'en est plus relevé."

On sait aujourd'hui que les électrons accélérés par la différence de potentiel provoquent l'émission de rayons X par effet *bremsstrahlung* c'est-à-dire par freinage lors de leur passage dans le champ des noyaux atomiques du matériau cible rencontré.

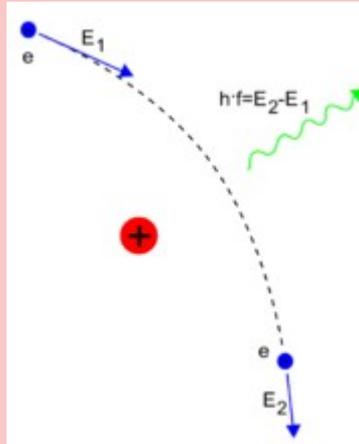
### **Le rayonnement de freinage, source d'apparition des rayons X dans le tube de Crookes**

<sup>5</sup> Friedrich W, Knipping P, von Laue M. *Interferenz-Erscheinungen bei Röntgenstrahlen*. Sitzungsberichte der Mathematisch-Physikalischen Klasse der Königlich-Bayerischen Akademie der Wissenschaften zu München, 1912: pp. 303-322.

<sup>6</sup> Von Laue Max, *Geschichtedes physik*. Bonn, 1946

Le rayonnement de freinage, de l'allemand *Bremsstrahlung*, est un rayonnement électromagnétique à large spectre créé par le ralentissement de charges électriques.

Lorsque l'on bombarde une cible avec un faisceau d'électrons, ceux-ci sont freinés et déviés par le champ électrique des noyaux de cette cible. Selon les équations de Maxwell-Lorentz, toute charge électrique dont la vitesse varie, en grandeur ou en direction, émet un rayonnement électromagnétique.



**Figure 3 : Rayonnement de freinage.** Les électrons passant à proximité des noyaux des atomes de la cible (à charge positive) sont déviés. Ils perdent de l'énergie et la différence d'énergie, pour un électron particulier, correspond à celle du photon X émis.

Comme la décélération des électrons n'est pas quantifiée, le rayonnement de freinage créé est un flux de photons dont le spectre en énergie est continu<sup>7</sup>. L'énergie émise sous forme de photons X est prélevée sur l'énergie cinétique  $E_c$  de l'électron de charge  $e$  qui poursuit sa trajectoire avec une énergie cinétique plus faible  $E'_c$  telle que :

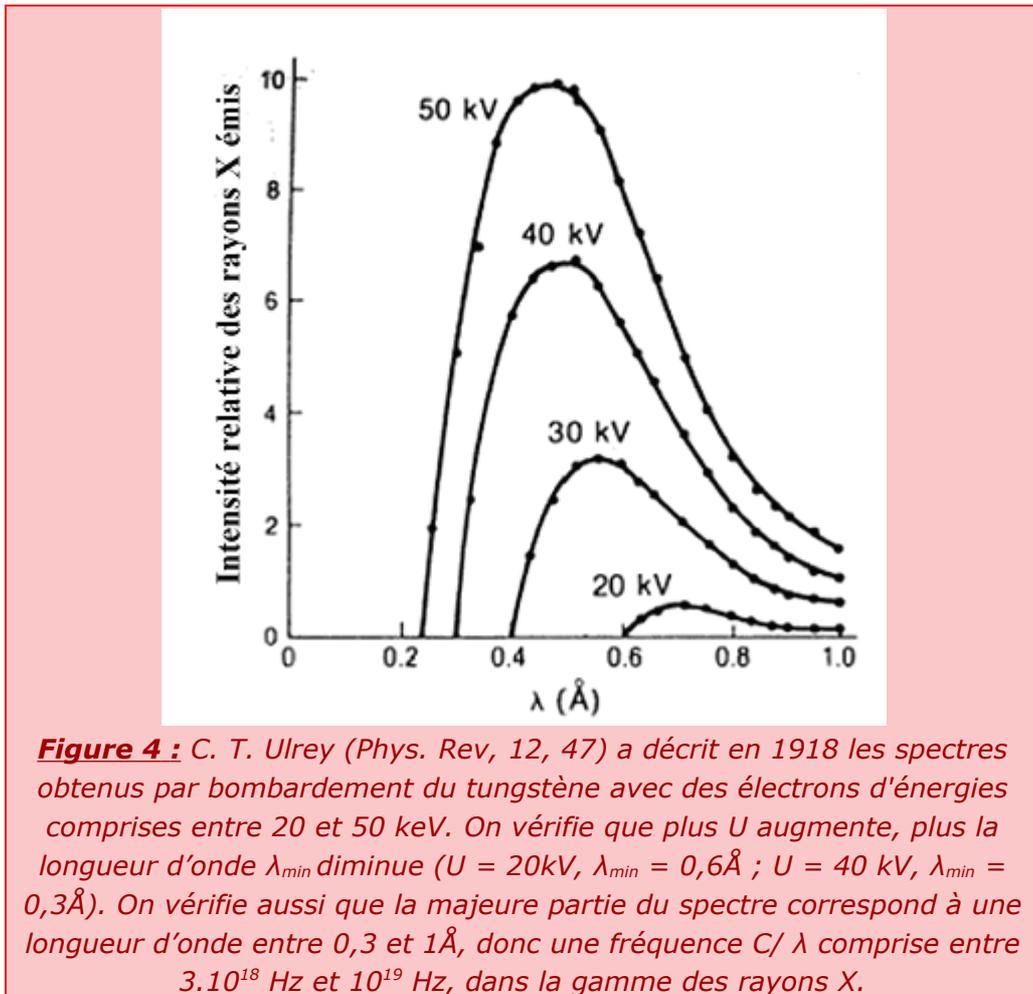
$$E'_c = E_c - h\nu$$

Si l'électron a été accéléré sous une différence de potentiel  $U$  et si toute l'énergie de l'électron incident est transformée en rayonnement, on obtient :

$$eU = h\nu_{\max} = \frac{hc}{\lambda_{\min}}$$

et, pour la longueur d'onde minimale du spectre :  $\lambda_{\min} = \frac{hc}{eU}$ .

<sup>7</sup> Les rayons X sont produits dans le matériau bombardé par les électrons de deux manières : 1) par le rayonnement de freinage (décrit ici), qui forme un spectre continu ; 2) par des raies monoénergétiques si les électrons incidents possèdent une énergie cinétique supérieure à l'énergie d'ionisation d'un électron du cortège électronique de l'atome-cible. Dans ce cas, l'électron du cortège change de niveau, et le retour à l'état stable s'effectue par émission d'un rayonnement X caractéristique de cette transition atomique. Ces raies monoénergétiques caractéristiques du matériau constituant la cible se superposent alors au spectre continu. Cette partie du spectre n'est pas représentée dans la figure 4.



### JUSTE APRÈS RÖNTGEN, LA CARACTÉRISATION DES RAYONS X

Alors que Röntgen n'est pas allé lui-même plus avant, les rayons X ont fait l'objet de recherches très nombreuses et approfondies, directement récompensées par six prix Nobel. Ils sont également à l'origine d'autres découvertes dont la plus retentissante est celle, en 1896, de la radioactivité.

À la mort de Röntgen en 1923, la connaissance des rayons X s'est considérablement accrue grâce à la contribution d'un grand nombre de physiciens. L'anglais C.G. Barkla (1877-1944, prix Nobel 1917), étudiant la diffusion des rayons X, a montré<sup>8</sup> que le rayonnement diffusé est caractéristique du matériau constituant la cible. Max von Laue (1879-1960, prix Nobel 1914) établit en 1912 la nature ondulatoire des rayons X grâce à l'observation de la diffraction par un cristal (cette technique est une méthode de mesure des longueurs d'onde des rayons X, qui consiste à recueillir par un monocristal fixe le cliché de diffraction d'un faisceau de rayons X, dont le spectre est continu)

<sup>8</sup> Barkla C. G. *Secondary radiation from gases subject to X rays*. *Phil. Mag.* 5, pp.685-98, 1903.

Moseley (1887-1915) précise en 1914 que l'intensité des raies X est fonction de  $Z^2$ ,  $Z$  étant le numéro atomique de l'élément considéré. Maurice de Broglie (1875-1960) conduit en France à partir de 1913 des travaux précurseurs, et développe en particulier la méthode du cristal tournant utile pour mesurer les distributions angulaires. Sir William Henry Bragg (1862-1942) et son fils, Sir William Lawrence Bragg (1890-1971), tous deux prix Nobel 1915, étudient, à partir de 1912, les cristaux à l'aide des rayons X et établissent la loi donnant la direction de leur diffraction entre les plans réticulaires : lorsque l'on bombarde un cristal avec un rayonnement dont la longueur d'onde est de l'ordre de la distance inter-atomique, il se produit un phénomène de diffraction, la loi de Bragg régissant cette diffraction en fonction de l'angle d'incidence. En 1922, Arthur Compton (1892-1962, prix Nobel 1927) étudie la diffusion des rayons X sur le graphite et découvre l'effet qui porte son nom.

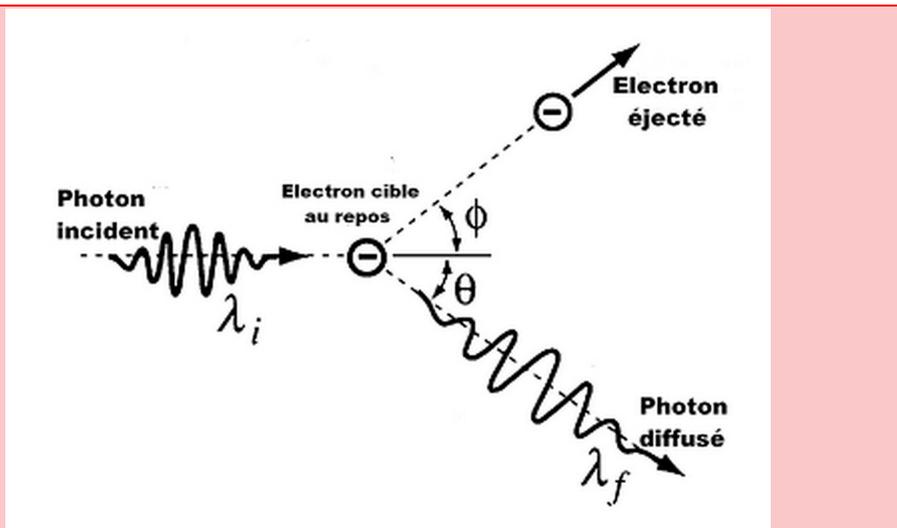
### **L'effet Compton**

Arthur Compton a été le premier à étudier la diffusion de photons X par les électrons d'une cible. Lorsque le photon cède une partie de son énergie à un électron qui est éjecté, le photon diffusé voit sa fréquence diminuer selon la relation de Planck liant l'énergie à la fréquence. Compton montra que le changement de fréquence ne dépend que de l'angle de diffusion pour une particule cible donnée<sup>9</sup>. L'expérience de Compton décrite dans son mémoire de 1923, utilise la raie X dite  $K\alpha$  du molybdène pour bombarder une cible en carbone. Un spectromètre de Bragg permet la comparaison des spectres des rayons X primaires et des X diffusés.

### **Formule de la diffusion Compton**

Considérons un photon d'impulsion  $\vec{p}_i$  et d'énergie  $E_i = \vec{p}_i c$  se dirigeant vers un électron au repos d'énergie initiale  $m_e c^2$ . Le photon est diffusé par l'électron dans une direction faisant un angle  $\theta$  par rapport à la direction d'origine. L'électron prenant une direction  $\Phi$ , l'impulsion du photon après diffusion sera  $\vec{p}_f$  et celle de l'électron  $\vec{p}_e$ .

<sup>9</sup> *A Quantum Theory of the Scattering of X-Rays by Light Elements*, Phys. Rev. 21, pp. 483-502, 1923.



**Figure 5 : Schéma de la diffusion Compton**

La conservation de l'impulsion et celle de l'énergie donnent l'équation de la diffusion Compton entre la longueur d'onde du photon incident et celle du photon diffusé :

$$\lambda_f - \lambda_i = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta)$$

Signalons aussi que Röntgen a donné son nom à deux unités. Lorsqu'un rayonnement pénètre la matière, il interagit avec elle et lui transfère de l'énergie. La dose absorbée par la matière caractérise ce transfert d'énergie : le röntgen (symbole R) est la dose de radiation ionisante qui produit une unité CGS électrostatique d'électricité dans un centimètre cube d'air sec à 0 °C sous une pression d'une atmosphère. D'autre part, le *rem* est l'abréviation de "*Röntgen Equivalent Man*" : c'est une ancienne unité de dose de radiation dans les tissus humains, à présent remplacée par le Sievert.

### CONCLUSION

La découverte des rayons X a valu à Röntgen la Médaille Rumford en 1896 puis le premier prix Nobel de physique en 1901. Elle a été primordiale dans l'amélioration des connaissances en physique et est à l'origine, de nos jours, d'un nombre incalculable d'applications dans tous les domaines de la connaissance. Cette découverte était inévitable, à la fin du dix-neuvième siècle car l'expérimentation sur les "rayons cathodiques" était alors systématique dans tous les laboratoires.

Röntgen est mort le 10 février 1923, à Munich.



*L'auteur remercie vivement Alexandre Moatti pour sa participation à la rédaction de la présente analyse.*