

1995 : centenaire de la découverte des rayons X **«Sur un nouveau type de rayons»**

par Bruno JECH
17000 La Rochelle

«Ich dachte nicht ; ich untersuchte»
Wilhelm Conrad Röntgen

Le 13 février 1895 était déposé sous le numéro 245032 un brevet relatif au *cinématographe*, «*appareil servant à l'obtention et à la vision des épreuves chronophotographiques*» ([5], [16]¹). Cet appareil, conçu par deux inventeurs au nom prédestiné - les frères Lumière - avait pour fonction, comme nous le savons, de projeter un faisceau de rayons lumineux restituant la réalité dans son image et son mouvement. Les médias d'aujourd'hui se sont tellement faits écho de la commémoration de cet événement et de ses suites qu'en dire plus ne pourrait qu'être superfétatoire.

Un peu moins de neuf mois plus tard, au cours de la soirée du 8 novembre 1895 et dans le calme d'un très modeste laboratoire de l'Université de Würzburg, le physicien Wilhelm Conrad Röntgen découvrait «un nouveau type de rayons», invisibles mais permettant de voir des choses dérobées à notre vue directe et dont les propriétés étaient si extraordinaires que l'annonce de cette découverte déchaîna, en son temps, un véritable déferlement médiatique, probablement plus important encore que celui que suscitèrent les premières projections cinématographiques.

Sans vouloir prétendre faire œuvre ici d'historien des sciences, il nous a semblé opportun de rappeler cet événement, tant pour l'importance que les rayons de Röntgen revêtent en physique (techniques d'ionisation, spectroscopie, ...), en chimie (cristallographie, analyse de polymères, cinétique chimique, ...) ou en astronomie (sources X), que celle qu'ils ont dans de nombreux secteurs de l'activité humaine (médecine, biologie, métallurgie, histoire de l'art, ... jusqu'à l'égyptologie et aux contrôles frontaliers). Cette multiplicité d'applications fait que ces rayons ont joué, directement ou indirectement, un rôle

déterminant dans l'histoire de la physique depuis 1895, au point que leur découverte «*peut être considérée comme une discontinuité*» dans cette histoire (E. Bauer, [31], t.3-1 p. 260). Mais avant de rappeler les circonstances de cette découverte, il n'est que justice de dire quelques mots sur celui qui la fit.

1. WILHELM CONRAD RÖNTGEN (1845-1923)

1.1. Une vie (presque) sans histoire

La vie de Röntgen ferait passer celle de Faraday ou de Maxwell pour des modèles d'existences trépidantes et débridées. Que celui qui se plonge dans la biographie de ce physicien allemand ne s'attende pas à des péripéties analogues à celles, multiples, que vécut Einstein ou à des frasques, parfois osées, d'un Feynman : cette biographie présente en effet le caractère émoustillant et passionné d'un rapport d'inspection de la fonction publique.

Wilhelm Conrad Röntgen naquit le jeudi 27 mars 1845 à Lennep (petite ville dépendant administrativement de Remscheid), à environ quarante kilomètres à l'est de Düsseldorf, dans une famille de la petite bourgeoisie locale - son père était fabricant et marchand de drap - et d'éducation protestante - ce qui n'est certainement pas indifférent au caractère plus que réservé dont il fit preuve par la suite. Les événements qui chahutèrent l'Europe en 1848 conduisirent les Röntgen à s'expatrier aux Pays-Bas (pour y faire de meilleures affaires), si bien que le jeune Wilhelm reçut une éducation hollandaise, d'abord à Apeldoorn (jusqu'à l'âge de dix-sept ans), puis à Utrecht². Il quitta alors la Hollande pour se présenter au Polytechnicum de Zurich (fondé en 1855) où ses solides prédispositions en matières scientifiques le firent admettre sans examen³. Dans cet institut, il eut entre autres pour professeurs Clausius⁴ et Kundt⁵ et obtint des notes qui ne s'écartèrent que très rarement du maximum. Après avoir brillamment décroché son diplôme d'ingénieur le 6 août 1868, il soutint une thèse de doctorat portant sur la compressibilité des gaz (1869), sujet sur lequel il reviendra assez souvent. Cette même année, il se fiança avec Anna Bertha Ludwig qu'il épousa trois ans plus tard.

La suite de la vie de Röntgen n'est alors qu'une succession de postes d'enseignement et de recherche, son *plan de carrière* étant d'ailleurs passablement contrarié parce qu'il n'avait pas suffisamment de connaissances en... latin du fait de son renvoi de l'école technique d'Utrecht : Würzburg (1870-1872), Strasbourg (1872-1875), Hohen-

heim (1875-1876), à nouveau Strasbourg (1876-1879). Durant cette période, le jeune physicien effectua un honnête travail de bon expérimentateur dans des conditions matérielles qui n'ont évidemment rien à voir avec celles rencontrées dans nos laboratoires modernes et pour des émoluments fort modestes. Toujours est-il qu'il étudia ainsi la chaleur spécifique des gaz (1870, 1873), la conductibilité thermique dans les cristaux et les décharges électriques (1874), la polarisation rotatoire magnétique découverte par Michael Faraday en 1845 (1878-1879), etc. tout en concevant des procédés techniques comme la soudure de certains verres (1873), un téléphone d'alarme (1877) ou un baromètre anéroïde (1878).

En 1879, il est enfin nommé professeur titulaire à l'Université de Giessen, à environ quatre-vingts kilomètres au nord de Frankfort : il y restera jusqu'en 1888. Poursuivant ses études expérimentales concernant l'effet d'un champ magnétique sur l'état de polarisation lumineuse, il fut ensuite presque naturellement conduit à aborder l'effet Kerr⁶ (1879), puis l'électrostriction (1880), les propriétés du quartz (1883) - et en particulier la pyroélectricité et la piézo-électricité, cette dernière ayant été découverte deux ans plus tôt par les frères Pierre et Jacques Curie [13], pp. 24-26 -, l'absorption de la chaleur par la vapeur d'eau, la viscosité de l'eau (1884), la compressibilité des fluides et des solides (1886-1888), ...

1.2. Les «courants de Röntgen»

En 1885, Röntgen réalisa une expérience qui revêt une certaine importance dans l'histoire de la physique. En effet, sept ans plus tôt, le physicien américain Henry Augustus Rowland (1848-1901) avait publié un article s'intitulant : «On the magnetic effect of electric convection (Sur l'effet magnétique de la convection électrique)». Dans cet article, il rapportait les résultats de sa célèbre expérience où un disque chargé électriquement et en rotation produit des effets magnétiques analogues à ceux observés avec des courants de conduction ([10], pp. 73-77). S'inspirant de ce travail, Röntgen effectua dès 1885 une nouvelle expérience où il mit en évidence des effets magnétiques produits par le déplacement d'un isolant dans un champ électrique uniforme ; il attribua ces effets à un nouveau type de courants qui fut appelé en 1901 *courants de Röntgen* par Henri Poincaré (1854-1912). Entrer dans le détail de cette expérience serait hors propos, mais il est utile de savoir qu'elle participa aux multiples tentatives de mise en évidence de l'éther luminifère, les plus célèbres étant celles d'Hippolyte Fizeau (1819-1896) ou encore celles effectuées à la même époque par Albert Abraham

Michelson (1852-1931) à l'aide de l'interféromètre auquel il donna son nom. Autrement dit, cette expérience contribua à l'élaboration de la théorie électromagnétique d'Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) et, dans une certaine mesure, à l'émergence de la théorie de la relativité d'Albert Einstein (1879-1955) ([31], t. 3-1 p. 188, [33], pp. 94 et 118).

Röntgen, à moitié satisfait de ses résultats expérimentaux qui ne donnaient que des indications qualitatives⁷, ne publia un article sur cette expérience qu'en 1888 ([25]) ; suite à un début de polémique avec Rowland, il dut même publier un second article en 1890 pour décrire le dispositif expérimental qu'il utilisa. Il est néanmoins étonnant de constater qu'il ne semble pas avoir véritablement tenté d'approfondir ce type de recherches qui étaient alors relativement « à la mode » ([15], pp. 97-102).

1.3. Würzburg

En 1888, Röntgen revint à Würzburg, à mi-chemin entre Frankfort et Nuremberg, mais cette fois avec les honneurs puisqu'il lui fut attribué la chaire de physique théorique. Il poursuivit avec ses élèves des études expérimentales concernant l'influence de la pression sur la compressibilité, l'indice de réfraction ou les propriétés électriques de diverses substances. Tous s'accordaient pour considérer Röntgen comme un expérimentateur de premier ordre qui réalisait souvent lui-même les appareils de mesure dont il avait besoin. De plus, il possédait une acuité visuelle qui, semble-t-il, était trois fois supérieure à la normale ([19], p. 40), ce qui lui conférait un atout indéniable dans le cas d'expériences aux effets ténus. Enfin, si Röntgen avait des élèves, il faut noter qu'il réalisait ses propres expériences seul et ne faisait que très rarement appel à une aide extérieure ([15], [19]).

Le 2 janvier 1894, il fut élu recteur de l'université de Würzburg. Durant cette même année 1894, il s'intéressa à nouveau aux décharges électriques, et plus précisément à un type de rayons passionnant expérimentateurs et théoriciens du temps : les *rayons cathodiques*.

2. DES RAYONS CATHODIQUES AUX RAYONS X

2.1. Une « belle lumière verte énigmatique »

L'abbé Jean Picard (1620-1682), astronome émérite de son état, qui transportait un baromètre de l'Observatoire de Paris à la place Saint Michel au cours d'une nuit de 1675, fit une observation fort

étrange durant cette opération : la chambre barométrique s'illuminait d'une lueur bleuâtre à chaque mouvement brusque du mercure.

Trente ans plus tard, l'Anglais Francis Hawksbee († v. 1713) entreprit d'étudier cette mystérieuse «*lumière barométrique*» : il montra que sa cause résidait dans les frottements du mercure sur le verre. Pour systématiser cette étude, il fut amené à réinventer la machine électrostatique⁸ à frottement, mais il ne semble pas qu'il ait établi un lien entre les manifestations lumineuses observées dans l'ampoule de sa machine et les phénomènes électriques dont l'étude systématique était d'ailleurs encore dans les limbes ([1], p. 44). Sautons le XVIII^e siècle où l'électricité passa du stade de curiosités de salon à celui de véritable sujet de recherche scientifique, et rejoignons Michael Faraday (1791-1867) qui, en 1838, alors qu'il étudiait la décharge électrique dans les gaz, remarqua qu'une partie du tube où avait lieu la décharge restait sombre (*espace obscur de Faraday*). Ne pouvant obtenir des vides plus poussés, Faraday ne progressa pas plus avant dans sa recherche mais il nota néanmoins : «*Les résultats relatifs aux différentes conditions de la décharge positive et négative auront sur la philosophie de la science électrique une influence bien plus grande que nous ne l'imaginons à présent*» (cité par E. Bauer [31], t. 3-1 p. 253).

A partir de 1851, il fut plus aisé d'obtenir des hautes tensions électriques pour effectuer ces décharges électriques grâce à l'invention de la bobine d'induction par l'électromécanicien allemand Heinrich Daniel Ruhmkorff. Cinq ans plus tard, Heinrich Geissler (1814-1879) améliora la technique du vide et réalisa des tubes à décharge (*tubes de Geissler*) présentant une partie capillaire où était observée une vive lueur de diverses couleurs selon le gaz (raréfié) se trouvant dans le tube ([3], pp. 71-73).

Ce fut grâce aux tubes de Geissler qu'en 1858, le mathématicien et physicien allemand Julius Plücker (1801-1868) observa une «*belle lumière verte énigmatique*» qui pouvait se déplacer sous l'action d'un aimant. Onze ans plus tard, son élève Johann Wilhelm Hittorf (1824-1914) compléta les expériences de Plücker et réussit à obtenir «*un faisceau de rayons sensiblement parallèles... [qui] est... très net, ... s'étend à une distance de plusieurs pieds et produit partout où il rencontre le verre une vive fluorescence verte*» ; de plus, dans un champ magnétique «*la lueur rayonnante se comporte comme un courant linéaire infiniment mince, rectiligne, sans poids, fixé à son extrémité voisine de la cathode*» (cité dans [1], p. 132). En 1876, le physicien

allemand Eugen Goldstein (1850-1930) montra que ces rayons étaient émis perpendiculairement à la cathode du tube à décharges et les désigna par *rayons cathodiques*⁹ ; mais pour lui, il s'agissait d'«*ondes éthériques essentiellement de même nature que la lumière*» ([11], p. 121).

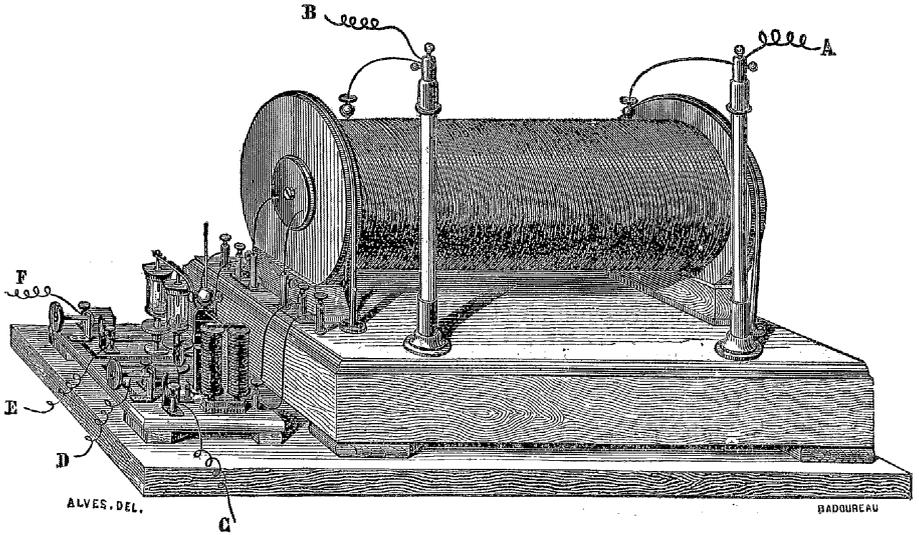


Figure 1 : Bobine de Ruhmkorff associée à un interrupteur de Foucault
(illustration extraite de : *Th. du Moncel, Exposé des applications de l'électricité, Tome 2, Lacroix-Paris, 1873, p. 252*).

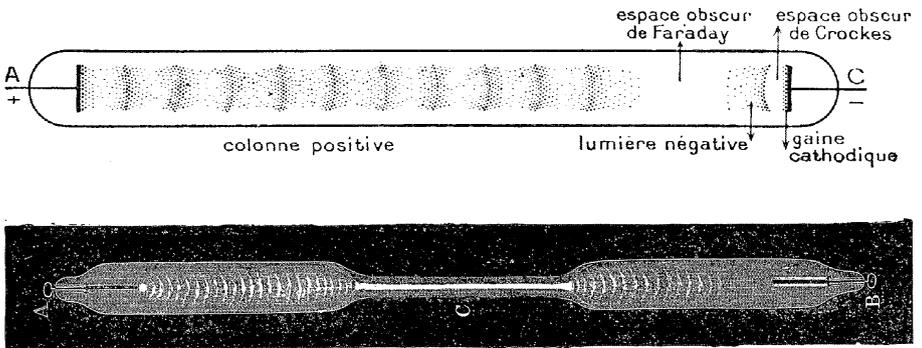


Figure 2 : Tube à décharges et tube de Geissler
(illustrations extraites de : [9], p. 584).

A contrario, en 1879, le physico-chimiste anglais William Crookes (1832-1919) conclut une longue série d'expériences à l'aide de tubes à décharge auxquels il a donné son nom en émettant l'hypothèse que ces rayons constituaient un *quatrième état de la matière* : il reprenait en cela une idée que l'Anglais Cromwell Varley (1828-1883) avait émise en 1871 afin d'expliquer le comportement de ces rayons par le mouvement de corpuscules chargés négativement émis par la cathode ([14], pp. 119-120, [19], p. 45, [31], p. 254). En 1880, la nature des rayons cathodiques n'était donc pas formellement élucidée. L'hypothèse de Goldstein eut un temps la préférence : en effet, en 1883, le grand physicien allemand Heinrich Hertz (1857-1894), utilisant une batterie

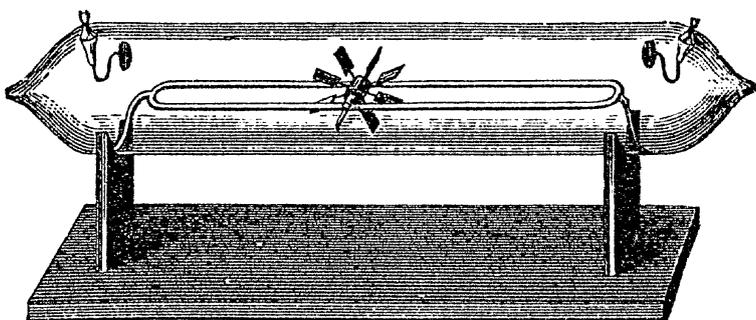
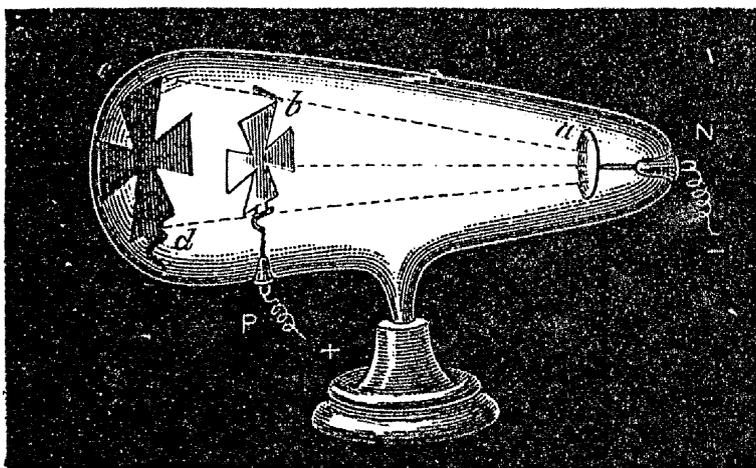


Figure 3 : Tubes de Crookes
(illustrations extraites de [20], pp. 196-197).

de mille accumulateurs au plomb, montra que les rayons cathodiques ne sont pas dus aux discontinuités de la bobine d'induction et ne seraient donc qu'«*un phénomène secondaire accompagnant la décharge*». Disposant un cylindre de Faraday à l'extérieur du tube à décharges, il constata que le cylindre restait neutre et en déduisit que les rayons cathodiques étaient eux-mêmes neutres. Autrement dit, pour Hertz comme pour Goldstein, les rayons cathodiques étaient certainement plus proches de la lumière que de la matière, leur déviation par un aimant s'apparentant à une rotation du plan de polarisation lumineuse. A la suite de Hertz, l'un de ses élèves, Philipp Lenard (1862-1947), défendit ardemment cette idée jusqu'en 1895... Mais le 30 décembre de cette même année, le jeune physicien français Jean Perrin (1870-1942) publia une courte note aux *Comptes-rendus de l'Académie des Sciences* où il rapportait des résultats expérimentaux faisant nettement pencher la balance en faveur des tenants de la matérialité des rayons cathodiques [21]¹⁰.

Ce rapide résumé sur l'histoire des rayons cathodiques montre à l'envi que ces derniers constituaient en 1895 un sujet de recherche de pointe et il n'est somme toute pas étonnant que Röntgen s'y soit intéressé¹¹.

2.2. Vendredi 8 novembre 1895

Le 26 juillet 1895, Maria Slodowska (1867-1934) épouse Pierre Curie (1859-1906) à la mairie de Sceaux. Durant ce même été, Albert Einstein, âgé de seize ans, rédige son premier mémoire scientifique (non publié) sur l'éther luminifère. Quelques mois plus tard, Wilhelm Conrad Röntgen, âgé de cinquante ans, publie sa cinquantième communication scientifique.

Comme nous l'avons dit, Röntgen s'intéressa aux rayons cathodiques dès le printemps 1894. En effet, il écrivit une lettre à Lenard le 4 mai 1894 afin que ce dernier lui indique comment se procurer des fenêtres de métal très mince permettant aux rayons cathodiques de passer du quasi-vide du tube à l'air environnant¹² : ainsi, dès le 21 juin 1894, il put faire ses premières observations sur ces tubes de Crookes modifiés par Lenard ([3], pp. 75-76, [15], p. 144). Mais les contraintes administratives du rectorat de Würzburg interrompirent ce travail et ce ne fut qu'à la fin du mois d'octobre 1895 que Röntgen eut la possibilité de se pencher à nouveau sérieusement sur ses tubes à rayons cathodiques.

La caractère très réservé de Röntgen est certainement à l'origine du fait qu'il n'a jamais vraiment raconté comment il avait découvert les rayons X ; le seul récit (réticent) qu'il en fit fut donné au journaliste scientifique anglo-saxon H.J.W. Dam, publié dans le *McClure Magazine* d'avril 1896. Voici quelques extraits de cette entrevue (tirés de [15], pp. 145-146). Lorsque le journaliste lui demande de raconter sa découverte, Röntgen répond :

«Il n'y a pas d'histoire... Je m'intéressais depuis longtemps aux problèmes des rayons cathodiques sortant d'un tube à vide, comme Hertz et Lenard l'avait découvert. Je suivais ces recherches, les leurs et d'autres, avec grand intérêt et j'avais décidé, dès que j'en aurais le temps, de mener quelques recherches personnelles. Je trouvais ce temps fin octobre [1895], J'y travaillais depuis quelques jours quand je trouvai quelque chose de nouveau.

– *C'était à quelle date ?*

– *Le 8 novembre.*

– *Et qu'avez-vous découvert ?*

– *Je travaillais avec un tube de Crookes qui était enveloppé d'un carton noir. Un morceau de papier enduit de platinocyanure de baryum se trouvait là, sur la table. Lorsque je fis passer un courant à travers le tube, je remarquais un étrange trait noir sur le papier.*

– *Et alors ?*

– *L'effet ne pouvait être produit que par le passage de la lumière, au sens usuel du terme. Mais cette lumière ne pouvait venir du tube, puisque la protection [du tube] était opaque à toute lumière, même à celle d'une lampe à arc.*

– *Et qu'avez-vous pensé alors ?*

– *Je ne pensais pas ; je cherchais (Ich dachte nicht ; ich untersuchte)»¹³.*

A partir de cette observation de la fluorescence du platinocyanure de baryum, en soi surprenante, Röntgen réalisa toute une série de petites expériences, les non moins surprenantes étant évidemment celles où il était possible de voir les os de sa main par exemple. Il faut se replacer dans le cadre de l'époque : les jours suivants le 8 novembre 1895, Röntgen fit et refit les mêmes expériences, n'en parlant à personne, même pas à sa femme. Après tout, n'avait-il pas la berlu  en voyant les os de sa main ? Cette «lumière» si mystérieuse existait-elle vraiment ? N'était-ce pas un nouveau type de rayons cathodiques ?

Vinrent les vacances scolaires de Noël, ce qui laissa un peu de temps au physicien pour rédiger sa première communication concernant sa découverte. Le 22 décembre, il conduisit sa femme dans son laboratoire ; il prit un cliché *radiographique* de la main gauche de son épouse, ce qui évidemment, ouvrit les yeux de cette dernière sur le comportement passablement étrange que son mari avait eu les semaines précédentes.

Bien sûr, le hasard a joué sa part dans la découverte de Röntgen. Mais cela ne limite en rien le mérite de ce dernier, car n'oublions pas que de nombreux physiciens travaillaient à la même époque sur les rayons cathodiques, sans pour autant observer ces nouveaux phénomènes. De plus, rappelons que Röntgen s'intéressait aux rayons cathodiques à l'*extérieur du tube à décharges* : ce fait le prédisposait à la découverte qu'il fit¹⁴. Alors hasard certes ! mais il fallait néanmoins faire preuve de sérieux dons d'observation pour relever ce que d'autres ont peut-être vu sans l'observer. Après tout et pour citer Pasteur, mort le 28 septembre de cette même année 1895 : «*Dans le champ de l'observation, le hasard ne favorise que les esprits préparés*» (cité dans [19]).

2.3. «*Ueber eine neue Art von Strahlen*»

Le 28 décembre 1895, le jour même où eut lieu la première séance publique et payante de projection cinématographique, la Société Physico-Médicale de Würzburg reçut donc une *communication provisoire* de onze pages s'intitulant «*Sur un nouveau type de rayons*» [26]. Dans ce mémoire, Röntgen rapportait en dix-sept points ses premières observations. Après avoir rappelé comment la fluorescence d'une feuille au platino-cyanure de baryum avait attiré son attention lors de la production de rayons cathodiques, il ajoute que tous les corps sont plus ou moins transparents à l'«*agent*» émis par les tubes de Hittorf, de Crookes ou de Lenard ; suit une liste de corps allant du papier au plomb en passant par un livre de mille pages et un jeu de whist. Dans une note de bas de page, Röntgen se propose de nommer cet «*agent*» : «*Pour abrégé, je voudrais employer le terme "rayons" et même "rayons X" pour les distinguer des autres [rayons]*». Presqu'en incidente, il note : «*Si l'on met la main entre l'appareil à décharges et l'écran, on voit l'ombre plus sombre des os de la main dans la silhouette un peu moins sombre de celle-ci*». Röntgen poursuit en donnant des résultats essentiellement qualitatifs de diverses études :

– transparence de corps en fonction de leur densité et de leur épaisseur,

- fluorescence de diverses substances provoquée par les rayons X,
- actions chimiques (éventuelles) de ces mêmes rayons.

Puis il pose des jalons pour de futures recherches : *«Je n'ai pas encore vérifié expérimentalement si les rayons X sont susceptibles d'avoir une action calorifique ; on peut cependant supposer l'existence de cette propriété après avoir prouvé, au travers des phénomènes de fluorescence, la capacité des rayons X à être transformés [énergétiquement] et il est certain que tous les rayons X tombant sur un corps ne le quittent pas comme tels [mais sous une autre forme énergétique]».*

A partir du paragraphe 7, Röntgen s'attache à étudier les propriétés optiques des rayons X, tout d'abord en les faisant passer à travers un prisme, puis à travers des poudres (pour la réfraction et la réflexion) : ces rayons semblent totalement indifférents à de telles manipulations. D'où il conclut : *«...les corps se conduisent à l'égard des rayons X de façon analogue aux milieux troubles à l'égard de la lumière».*

Reste à savoir s'il y a identité entre les rayons X et les rayons cathodiques. Röntgen remarque tout d'abord que l'absorption par l'air des rayons X est considérablement plus faible que celle des rayons cathodiques qui ne peuvent être observables qu'au voisinage direct du tube à décharges. Puis : *«Une autre différence très remarquable dans le comportement des rayons cathodiques et des rayons X réside dans le fait qu'il ne m'a pas été possible, malgré tous mes efforts, d'obtenir une déviation des rayons X avec un aimant, même avec des champs magnétiques très intenses (§ 11)».* Ce qui lui permet de conclure : *«J'arrive donc à ce résultat que les rayons X ne sont pas identiques aux rayons cathodiques, mais qu'ils sont produits par les rayons cathodiques dans la paroi de verre de l'appareil à décharges».*

Au paragraphe 14, Röntgen justifie le fait d'avoir utilisé le terme de «rayon» par leur propagation en ligne droite et la formation d'ombres régulières d'objets interposés entre le tube à décharges et un écran fluorescent ou une plaque sensible (les premières radiographies).

En définitive, s'agirait-il d'ondes ? *«J'ai fait beaucoup d'expériences en vue de mettre en évidence des interférences de rayons X, mais malheureusement sans succès, peut-être seulement du fait de leur faible intensité (§ 15)».* Constitueraient-ils alors un type de rayons ultra-violets ? ... Mais il faudrait, dans ce cas, *«admettre que ces rayons ultra-violetts se comportent de façon tout à fait différente de celle des*

rayons infrarouges, visibles et ultra-violetes connus jusqu'à maintenant. Je n'ai pas pu m'y résoudre et ai cherché une autre explication». Et cette explication c'est : «Les nouveaux rayons ne devraient-ils pas être décrits par des vibrations longitudinales de l'éther ? Je dois reconnaître que je me suis fait de plus en plus à cette idée au cours de mes recherches et je me suis donc permis d'énoncer cette conjecture, bien que je sache pertinemment que l'explication donnée nécessite d'être plus étayée». C'est ainsi que se termine le premier mémoire de Röntgen sur les rayons X.

2.4. Célèbre malgré lui

Au début de l'année 1896, Röntgen envoya des tirés-à-part de son travail avec des clichés radiographiques à diverses sommités physiciennes en Europe, en particulier à Ludwig Boltzmann (1844-1906), à Lord Kelvin (1824-1907), à George Gabriel Stokes (1819-1903) et à Henri Poincaré : tous furent profondément impressionnés par la nouveauté de la découverte. Parallèlement, la presse, ayant eu vent des propriétés extraordinaires des rayons X, popularisa le nom de Röntgen bien au-delà des frontières germaniques. L'empereur Guillaume II demanda à rencontrer le physicien, ce qui fut fait le 13 janvier 1896 ; Röntgen déclina ensuite les autres invitations mondaines. Il prononça une conférence le 23 janvier... et ce fut la seule. Même lors de la réception du tout premier prix Nobel de physique qu'il reçut en 1901, il ne fit pas de discours. Les honneurs pleuvèrent, mais il est manifeste que cette soudaine popularité lui pesait. La recherche ne fut alors guère un refuge, car force est de constater que sa production scientifique après la découverte de 1895 est bien légère : une dizaine d'articles seulement portant sur des sujets mineurs sur une période de... vingt-huit ans.

En mars 1896, Röntgen envoya une deuxième communication sur les rayons X à la Société Physico-Médicale de Würzburg (six pages [27]) ; il y décrivait la possibilité de décharger des corps électrisés et d'ioniser l'air environnant à l'aide de rayons X et montrait que tous les corps pouvaient émettre de tels rayons.

En mai 1897, de «Nouvelles observations sur les propriétés des rayons X» (quinze pages, [28]) n'apportèrent en fait pas vraiment de nouveauté, simplement des précisions sur les observations qualitatives des deux premiers mémoires ; et cette communication se terminait sur un échec : «*Je ne peux rapporter aucune expérience me permettant de conclure avec fermeté à l'existence d'une diffraction des rayons X*». Röntgen n'en dira pas plus : il n'écrira plus rien directement sur cette

question. Selon Max von Laue qui connut bien Röntgen, la raison de ce silence provient peut-être du fait que le découvreur (qui avait cinquante ans) a été «écrasé» par sa découverte : *«toute grande œuvre de l'esprit pèse sur celui qui l'a accomplie»* (cité dans [19], p. 81). A cela s'ajoutait que Röntgen vivait mal jaloux et rancœur (Lenard, Quincke) que suscita sa célébrité, ce qui ne favorise guère la recherche.

En 1900, il quitta Würzburg pour Munich où il prit la direction de l'Institut de Physique afin d'en terminer la construction ; il s'acquitta consciencieusement de cette tâche, tout en s'isolant de plus en plus ([17], pp. 274-281). Puis vint la première guerre mondiale, la mort de sa femme en 1919... Le 10 février 1923, succombant à un carcinome de l'intestin (tumeur cancéreuse), il rendit l'âme à l'âge de soixante-dix-huit ans ([15], [19]).

3. LA X-MANIA

Elle : Je voudrais me faire photographier.

Le photographe : Très bien madame, avec ou sans ?

Elle : Avec ou sans quoi ?

Le photographe : Les os.

Life, 27 avril 1896

3.1. Comme une traînée de poudre...

Si les rayons X rencontrèrent un grand succès public auprès de l'homme (et de la femme) de la rue grâce à (ou à cause de) la presse et aux clichés radiographiques à cent sous que proposaient alors (avec inconscience) des échoppes de boulevard, l'effet ne fut pas moins foudroyant dans la communauté scientifique. En Allemagne, comme partout dans le monde, les expérimentateurs et les théoriciens s'attaquèrent à ce nouveau champ de recherche. En France par exemple, il y eut cent trente cinq communications et notes publiées dans les *Comptes-rendus* de l'Académie des Sciences durant le premier semestre de 1896 et plus de mille de par le monde au cours de cette même année ([29], pp. 41 et 43). Ainsi, Jean Perrin, après avoir répété les expériences de Röntgen dès janvier 1896, étudia plus particulièrement l'ionisation des gaz par les rayons X, phénomène que le physicien allemand avait mis en évidence comme nous l'avons vu ([22], [23]) ; à la même époque, au Cavendish Laboratory de Cambridge, Joseph John Thomson (1856-1940) fut à l'origine de toute une série de travaux d'importance sur ce même phénomène, aidé en particulier par ses élèves Ernest Rutherford

(1871-1937) et John Sealy Edward Townsend (1866-1957) ; à Naples, le physicien italien E. Villari se pencha également sur les propriétés de l'«*air röntgenisé*» ([35])... Suite à ces travaux, comme l'écrivit Millikan, «*il apparut clairement... que les constituants d'un atome neutre, même celui d'une substance mono-atomique, devaient être de minuscules charges électriques. Nous avons ainsi la première preuve directe (1) de la structure complexe de l'atome et (2) du fait que des charges électriques entrent dans sa constitution*». Et il ajoute, en le soulignant : «*Cette découverte, dérivée directement de l'emploi d'un agent nouveau, les rayons X, discréditait à jamais la théorie de l'insécabilité de l'atome, et inaugurait l'ère des constituants de l'atome*» ([18], pp. 48-49).

Le 20 janvier de cette même année 1896, Henri Poincaré qui fut l'un des tout premiers à prendre connaissance de la découverte de Röntgen et qui venait de présenter des clichés radiographiques à l'Académie, fut questionné afin que soit précisée la partie du tube à décharges d'où étaient émis les rayons X. Celui qui posait la question était Henri Becquerel (1852-1908). Quatre ans plus tard, au Congrès international de Physique de Paris, Becquerel pouvait dire : «*La découverte du rayonnement spontané de l'uranium a été une conséquence des idées que fit naître la découverte des rayons X... Depuis le jour où j'avais eu connaissance de la découverte du professeur Röntgen, il m'était... venu à l'idée de rechercher si la propriété d'émettre des rayons très pénétrants n'était pas intimement liée à la phosphorescence...*» ([2], pp. 47-48). L'idée de départ de Becquerel, inspirée par une suggestion émise par Poincaré, était simple : si les rayons X provoquent la fluorescence, inversement un corps fluo- ou phosphorescent pouvait peut-être émettre de tels rayons. Le 24 février 1896, il constata qu'effectivement certaines substances phosphorescentes comme les sels d'uranium impressionnent une plaque photographique au travers un écran opaque... mais le 1^{er} mars suivant, il se rendit compte que ces sels n'avaient pas besoin d'être excités par la lumière pour avoir une telle action : il découvrait ainsi la radioactivité. Deux ans plus tard, Pierre et Marie Curie annonçaient l'existence du polonium (juillet 1898) et du radium (décembre 1898) ([14], pp. 63-74). La suite est une autre histoire, mais il est manifeste qu'il y a filiation directe entre la découverte des rayons X (elle-même résultant de l'étude des rayons cathodiques) et celle de la radioactivité.

3.2. De la nature des rayons X

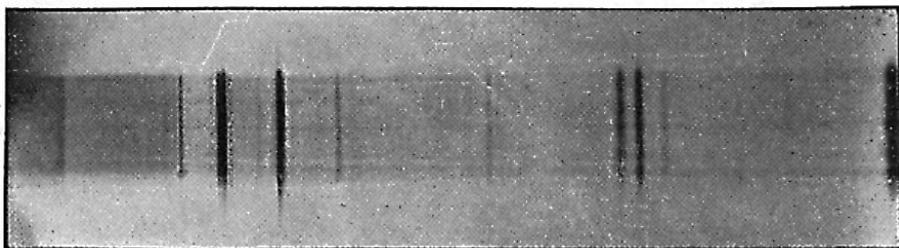
Restait à définir la nature de ces fameux rayons. En 1896, George Stokes, convaincu que les rayons cathodiques étaient de nature

corpusculaire et analysant le mécanisme d'émission des rayons X, proposa l'hypothèse qui suit : «*L'absence, ou la quasi absence de diffraction et d'interférence des rayons X conduit à l'alternative suivante : ou bien ils sont de longueur d'onde extrêmement petite, ou bien ils sont non périodiques ou très faiblement périodiques, la lumière X étant considérée dans la dernière hypothèse comme une immense succession d'impulsions indépendantes, analogues aux "lignes de feu" ("hedge-fire") d'un régiment de soldats*» ([30], p. 255). Le physicien allemand Emil Wiechert (1861-1928) émit simultanément une théorie analogue à celle de Stokes. Cette théorie, précisée ensuite par J.-J. Thomson, stipulait donc que les rayons X étaient engendrés par le choc sur l'anticathode des particules chargées constituant les rayons cathodiques, qu'ils ne différaient pas essentiellement de la lumière et que la théorie de Maxwell leur était applicable. Autrement dit, «*les rayons X, aussi bien que la lumière, sont considérés comme consistant en vibrations transversales qui se propagent le long des lignes de Faraday*¹⁵» (Campbell [11], pp. 302-322). L'idée donc que les rayons X soient de nature électromagnétique vint donc très tôt à l'esprit des physiciens, même si tous ne la partageaient pas ; Röntgen lui-même inclinait pour des ondes électromagnétiques (longitudinales il est vrai). Mais il fallut attendre encore bien des années pour s'assurer de leur nature ondulatoire. En 1912, écrivant son célèbre ouvrage sur *Les atomes*, Jean Perrin notait encore à propos de ces rayons : «*Ils ne peuvent être ni réfléchis, ni réfractés, ni diffractés, en sorte que, s'ils sont formés par des ondes, ces ondes sont beaucoup plus courtes que celles de l'extrême ultra-violet (0, 1 μ) jusque-ici étudié*» ([24], p. 227). Il n'était donc pas possible, pour de telles longueurs d'onde d'observer un phénomène de diffraction notable avec des orifices usuels, même avec des réseaux de Fraunhofer. D'ailleurs, toujours en 1912, Arnold Sommerfeld (1868-1951), qui travaillait à Munich comme Röntgen et qui avait perfectionné la théorie de Stokes-Wiechert-Thomson dans (presque) ses moindres détails, montra que la longueur d'onde des rayons X durs devait être de l'ordre de $4.10^{-5} \mu\text{m}$, soit dix mille fois plus petite que les longueurs d'onde du violet¹⁶.

A la même époque, en février 1912, à Munich toujours, l'un des thésards de Sommerfeld, Peter Paul Ewald, qui étudiait le comportement de la lumière dans un réseau spatial d'atomes et qui éprouvait quelques difficultés dans cette étude, vint trouver Max von Laue (1879-1960). Écoutons ce dernier : «*Si l'on envoyait des rayons de Röntgen à travers un cristal, alors le rapport des longueurs d'onde et des constantes de réseau cristallin était extraordinairement favorable.*

Je dis immédiatement à Ewald, que j'escomptais de cette façon des phénomènes d'interférences avec les rayons de Röntgen» (cité dans [15], p. 299). Sommerfeld ne fut pas enthousiasmé par cette idée - il pensait que l'agitation thermique détruirait les interférences - et Ewald ne la testa pas. A la demande de von Laue, un assistant de Sommerfeld, Walter Friedrich et un assistant de Röntgen, Paul Knipping, travaillèrent «au noir» pour lui. Et ce fut ainsi que, le 23 avril 1912, un morceau de sulfure de cuivre¹⁷ révéla la diffraction cristalline des rayons X ; Max von Laue fit la théorie du phénomène, puis en fit l'annonce le 8 juin à l'Académie des Sciences de Bavière et publia avec ses deux «travailleurs au noir» un article circonstancié en juillet 1912. Très peu de temps après, à Leeds, en Angleterre, William Henry Bragg (1862-1942), qui attribuait une nature corpusculaire aux rayons X, fut convaincu par son fils William Lawrence (1890-1971) de son erreur (*loi de Bragg*) et tous deux réalisèrent un spectrographe à rayons X permettant d'explorer la «perfection du cristal» ([6]). En France, Maurice de Broglie (1875-1960) inventa quand à lui la technique du *cristal tournant* (novembre 1913) ([7], [8]) et réalisa ainsi des spectres de rayons X ; le jeune physicien anglais Henry Moseley (1887-1915)¹⁸ exploita ces spectres et en déduisit le loi qui porte son nom, liant numéro atomique et longueur d'onde des raies X (1914)... En bref, la cristallographie et la spectrographie X étaient nées : comme le remarque Emilio Segré, si la biologie moléculaire provoqua en biologie «une révolution comparable à celle provoquée par la mécanique quantique en physique», ne le doit-elle pas, en particulier, à l'analyse aux rayons X des structures moléculaires ? ([29], p. 187).

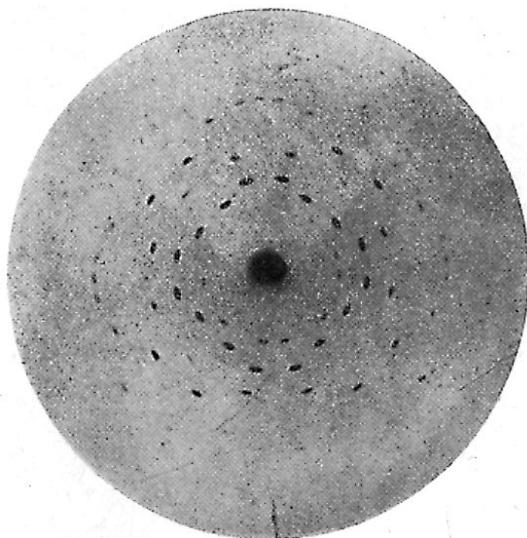
Énumérer tous les services inestimables que rendirent les rayons X aux physiciens nous conduirait trop loin. Ne citons que le rôle de premier plan qu'ils jouèrent dans la mesure de la charge de l'électron en 1912 par Robert Andrews Millikan (1868-1953) ([18]) ou dans la mise en évidence en 1923 par Arthur Holly Compton (1892-1962) de l'effet qui porte son nom ([32]). Cette dernière expérience permit certes de tester la théorie de la relativité restreinte, mais elle mit surtout en... lumière le caractère corpusculaire des rayons X : en 1924, Millikan notait que l'expérience de Compton «constitue peut-être la preuve la meilleure que l'on ait pu fournir jusqu'ici en faveur de l'hypothèse des *quanta d'Einstein*» ([18], p. 308). Nul n'ignore que, du point de vue de la physique classique, comportements corpusculaires et ondulatoires sont contradictoires ; en 1925, trente ans après la découverte des rayons X, la mécanique quantique passait outre à la contradiction.



Spectre de rayons X du platine
Cliché pris par Maurice de Broglie ([7]).



Spectre de rayons X du tungstène
Cliché pris par Maurice de Broglie ([7]).



Diagrammes cristallin de Laue
Cliché pris par Maurice de Broglie ([7]).

Aujourd'hui, les rayons X font partie de l'anonymat de la vie courante. Il est loin le temps où l'on s'extasiait sur un cliché radiographique de sa main, comme est loin le temps où les spectateurs du *Grand Café* s'émerveillaient lors des projections de l'*Arroseur arrosé*. Dans les pays germaniques, le nom de Röntgen a perdu sa majuscule pour signifier *radiographier*. En France en revanche, ce nom n'est plus guère connu que des scientifiques (et encore !) ; il y a bien la rare *roentgentherapie* (à laquelle est préférée *radiothérapie*) et ils ne sont pas légion ceux qui savent que le *roentgen* (1 R) est l'unité représentant la quantité de rayonnement X ou γ produisant une ionisation de $2,58.10^{-4}$ coulomb par kilogramme d'air... Somme toute, Röntgen faisait preuve d'une parfaite lucidité teintée d'une extrême modestie quand, dans la nécrologie de Friedrich Kohlrash, il écrivait en 1910, à propos de l'expérimentateur et de son travail : «*Il doit s'attendre à la possibilité, et presque toujours à la certitude, que son travail sera dépassé par d'autres en relativement peu de temps ; les méthodes qu'il a conçues sont améliorées et les résultats obtenus précisés. Ainsi disparaît petit à petit le souvenir de sa personne et de son œuvre*» (cité dans [15], p. 320). Quitte à faire mentir Röntgen, répétons que ce n'est que justice de rappeler son souvenir et son œuvre, d'autant qu'il y aurait quelque justesse à faire débiter le XX^e siècle des physiciens... le 8 novembre 1895.

NOTES

- (1) Les numéros entre crochets, parfois accompagnés de numéros de page, renvoient aux sources bibliographiques.
- (2) Dans une petite école technique dont il fut rapidement exclu pour ne pas avoir voulu dénoncer l'un de ses camarades (1863), ensuite à l'Université de cette ville après avoir étudié seul quelques temps (1863-1865).
- (3) Exactement trente ans plus tard, l'année de la découverte des rayons X, un autre jeune homme suivra un itinéraire relativement analogue : après avoir quitté son lycée de Munich sans avoir son diplôme de fin d'études secondaires parce qu'écœuré par la pédagogie prussienne, le jeune Albert Einstein se présenta au même Polytechnicum. Il dut toutefois passer l'examen d'entrée auquel il échoua une première fois ; il est vrai qu'il n'avait que seize ans alors que Röntgen, dans les mêmes conditions, en avait vingt.

- (4) Rudolf Emanuel Clausius (1822-1888), physicien allemand qui eut un rôle déterminant dans la formulation des principes de la thermodynamique en introduisant en particulier le concept d'entropie.
- (5) August Kundt (1839-1894), physicien allemand, connu surtout pour ses travaux en acoustique (tube de Kundt) et en optique (dispersion anormale de la lumière).
- (6) John Kerr (1824-1907), physicien écossais qui découvrit en 1875 que des corps transparents amorphes et même liquides deviennent biréfringents lorsqu'ils sont placés dans un champ électrique. Les diélectriques en question doivent être constitués de molécules ayant un moment dipolaire important, leur orientation par le champ électrique provoquant l'anisotropie optique.
- (7) Il faudra attendre 1903 et les expériences du russe Alexander Eichenwald (1863-1944) pour obtenir des résultats quantitatifs.
- (8) La toute première ayant été conçue en 1672 par Otto von Guericke (1602-1686).
- (9) Dix ans plus tard, après avoir percé la cathode d'orifices, Goldstein mit en évidence des rayons positifs, également appelés «rayons canaux».
- (10) Voir notre article : «*Sur une expérience importante de Jean Perrin*» à paraître dans un prochain B.U.P.
- (11) Sur les recherches concernant les rayons cathodiques à cette époque jusqu'en 1900, voir [34] ; plus particulièrement, pour les recherches sur les rayons cathodiques à l'extérieur d'un tube de Crookes-Lenard - recherches qui intéressaient plus particulièrement Röntgen -, voir Coolidge et Moore, [12]. Rappelons que nous devons au physico-chimiste américain William David Coolidge (1873-1975) l'invention en 1913 du tube à cathode chaude qui porte son nom et qui est utilisé depuis pour produire les rayons X.
- (12) Phénomène que Hertz - qui mourut le premier janvier de cette même année 1894, à l'âge de trente-six ans - avait découvert deux ans plus tôt et que Lenard avait particulièrement étudié. Dans sa lettre, Röntgen qualifie l'expérience de Lenard d'«*importante*».
- (13) A noter que si H.J.W. Dam a mis «*tube de Crookes*» dans la bouche de Röntgen, il s'agit plutôt d'un tube de Lenard comme le remarque A. Fölsing ([15], p. 147).
- (14) Lenard, qui fut un ardent anti-relativiste et eut un comportement éminemment antisémite durant le III^e Reich, utilisa cette circons-

tance pour tenter de minimiser la découverte de son confrère, argant du fait qu'il avait conçu les tubes que manipulait Röntgen ([19], pp. 84-85).

- (15) A savoir les lignes de champ électrique. Peut-être s'agit-il là d'une erreur de traduction du livre de Campbell, mais il eût été plus correct d'écrire : «*vibrations transversales le long des lignes de Faraday et qui se propagent*».
- (16) Aujourd'hui, nous savons que les longueurs d'ondes des rayons X vont grosso-modo de 10^{-2} à 10^{-6} μm (pour les plus durs).
- (17) Et non de sulfate de cuivre ou de blende (ZnS), comme il est dit parfois.
- (18) Qui fut tué pendant l'expédition anglaise aux Dardanelles, à l'âge de vingt-huit ans.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] E. BAUER : «*L'électromagnétisme hier et aujourd'hui*», Albin Michel - Paris, 1949.
- [2] H. BECQUEREL : «*Sur le rayonnement de l'uranium et sur diverses propriétés physiques du rayonnement des corps radioactifs*» in *Rapports présentés au congrès international de physique de 1900*, Gauthier Villars - Paris, 1900, pp. 47-48.
- [3] W. BEIER : «*Wilhelm Conrad Röntgen*», Teubner-Stuttgart, 1995.
- [4] A. BORDEAUX : «*Histoire des sciences aux XIX^e siècle*», Béran-ger - Paris Liège, 1920.
- [5] R. BOUSSINOT : «*L'encyclopédie du cinéma*» (4 tomes), Bordas - Paris, 1980.
- [6] W. BRAGG : «*Le progrès des sciences physiques*» in *Le progrès scientifique*, Félix Alcan - Paris, 1938.
- [7] M. de BROGLIE : «*Les progrès de nos connaissances concernant les rayons de Röntgen*» in *Les progrès de la physique moléculaire*, Gauthier Villard - Paris, 1814.
- [8] M. de BROGLIE et J. THIBAUD : «*Les rayons X et les rayons γ* » in *Comptes-rendus du congrès international d'électricité de Paris - 1932, première section*, Gauthier Villars-Paris, 1932, pp. 931-947.
- [9] G. BRUHAT : «*Cours d'électricité*», Masson-Paris, 1929.

- [10] J.Z. BUCHWALD : «*From Maxwell to Microphysics, Aspects of Electromagnetic Theory in the Last Quarter of the Nineteenth Century*», University of Chicago Press-Chicago, 1985.
- [11] N.R. CAMPBEEL : «*La théorie électrique moderne, théorie électro-nique*», Hermann-Paris, 1919.
- [12] W.D. COOLIDGE et C.N. MOORE : «*Étude expérimentale des rayons cathodiques en dehors du tube générateur*» in *Comptes-rendus du congrès international d'électricité de Paris - 1932, première section*, Gauthier Villars - Paris, 1932, pp. 873-890.
- [13] M. CURIE : «*Pierre Curie*», Payot - Paris, 1924.
- [14] P. et M. CURIE : «*Les nouvelles substances radioactives et les rayons qu'elles émettent*», in *Rapports présentés au congrès international de physique de 1900*, Gauthier Villars - Paris, 1900, pp. 79-114.
- [15] A. FÖLSING : «*Wilhelm Conrad Röntgen, Aufbruch ins Innere der Materie*» Hanser Verlag-München, 1995.
- [16] P. d'HUGUES : «*Almanach du cinéma*» (2 tomes), Encyclopedia Universalis - Paris, 1992.
- [17] C. JUNGnickel et R. McCORMMACH : «*Intellectual Mastery of Nature, Theoretical Physics from Ohm to Einstein - Volume 2 : The Now Mighty Theoretical Physics 1870-1925*», University of Chicago press-Chicago, 1986.
- [18] R.A. MILLIKAN : «*L'électron*», Félix Alcan - Paris, 1926.
- [19] J. NICOLLE : «*Wilhelm Conrad Röntgen et l'ère des rayons X*», Seghers - Paris, 1965.
- [20] H. PELLAT : «*Cours d'électricité - Tome I*», Gauthier Villars - Paris, 1901.
- [21] J. PERRIN : «*Nouvelles propriétés des rayons cathodiques*», *Comptes-rendus des séances de l'Académie des Sciences*, 30 décembre 1895.
- [22] J. PERRIN : «*Mécanisme de la décharge des corps électrisés par les rayons de Röntgen*», in *L'Éclairage Électrique* du 20 juin 1896.
- [23] J. PERRIN : «*Rôle du diélectrique dans la décharge par les rayons de Röntgen*», *Comptes-rendus des séances de l'Académie des Sciences*, 19 août 1896 ; «*Décharges par les rayons de Röntgen ; influence de la pression et de la température*», *Comptes-rendus*, 23 novembre 1896 ; «*Décharges par les rayons de Röntgen. Rôle des surfaces frappées*», *Comptes-rendus*, 1^{er} mars 1897 ; «*Dé-*

charge par les rayons de Röntgen. Effets secondaires», *Comptes-rendus*, 17 janvier 1898.

- [24] J. PERRIN : «*Les atomes*», (réédition) Gallimard-Paris, 1970.
- [25] W.C. RÖNTGEN : «*Ueber die durch Bewegung eines im homogen electrischen Felde bedinglichen Dielectricums hervorgerufene electrodynamische Kraft*», in *Annalen der Physik und Chemie*, XXXV, 1888, pp. 264-269.
- [26] W.C. RÖNTGEN : «*Ueber eine neue Art von Strahlen*», reproduction in *Annalen der Physik und Chemie*, LXIV, 1898, pp. 1-11.
- [27] W.C. RÖNTGEN : «*Ueber eine neue Art von Strahlen II*», reproduction in *Annalen der Physik und Chemie*, LXIV, 1898, pp. 12-17.
- [28] W.C. RÖNTGEN : «*Weitere Beobachtungen über die Eigenschaften der X-Strahlen*», reproduction in *Annalen der Physik und Chemie*, LXIV, 1898, pp. 18-37.
- [29] E. SEGRÉ : «*Les physiciens modernes et leurs découvertes, des rayons X aux quarks*», Fayard-paris, 1984.
- [30] G.G. STOKES : «*On the nature of the Röntgen rays*» in *Mathematical and physican papers* - vol. V, Cambridge University Press, 1905, pp. 254-277.
- [31] R. TATON et al. : «*Histoire générale des sciences*», Presses Universitaires de France - Paris, Tome 2 (*La science moderne*) - 1969, Tome 3-1 (*Le XIX^e siècle*) - 1961, Tome 3-2 (*Le XX^e siècle*) - 1964.
- [32] J. THIBAUD : «*L'effet Compton*» in *Comptes-rendus du congrès international d'électricité de Paris - 1932, première section*, Gauthier Villars - Paris, 1932, pp. 949-961.
- [33] M.A. TONNELAT : «*Histoire du principe de la relativité*», Flammarion-Paris, 1971.
- [34] P. VILLARD : «*Les rayons cathodiques*», in *Rapports présentés au congrès international de physique de 1900*, Gauthier Villars - Paris, 1900, pp. 115-137.
- [35] E. VILLARI : «*Les charges électriques et les gaz ionisés*», in *Rapports présentés au congrès international de physique de 1900*, Gauthier Villars - Paris, 1900, pp. 152-163.