

Sur une expérience importante de Jean PERRIN

par Bruno JECH
17000 La Rochelle

*«Tout est plus simple qu'on ne peut l'imaginer
et en même temps plus enchevêtré
qu'on ne saurait le concevoir».*

Johann Wolfgang Goethe

Il y a cent ans à peine, le 30 décembre 1895, deux jours après que Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923) eut communiqué au monde sa découverte d'un nouveau type de rayons, les rayons X, Jean Perrin (1870-1942), alors jeune agrégé-préparateur à l'École Normale Supérieure, apportait la preuve expérimentale que les rayons cathodiques *«charrient toujours avec eux de l'électricité négative dont on ne peut absolument pas les séparer»* ([20], p. 226).

Nous nous proposons dans ce qui suit de décrire l'expérience qui conduisit Perrin à cette conclusion et de rappeler les conséquences directes et indirectes que ladite expérience eut sur les théories de l'électricité en particulier et de la matière en général. Mais, dans un premier temps et pour remettre en situation la découverte de Perrin vis-à-vis des conceptions du temps relatives à la nature des rayons cathodiques, il n'est certainement pas inutile de donner quelques éléments sur l'histoire de ces rayons... d'autant que l'expérience qui fait l'objet de cet article faillit être réalisée douze années plus tôt par un autre grand nom de la physique, Heinrich Hertz (1857-1894).

1. DE LA NATURE DES RAYONS CATHODIQUES

1.1. Préhistoire

Ce fut l'étude des décharges électriques dans les gaz à basse pression qui conduisit à la découverte des rayons cathodiques. Sans aller jusqu'à remonter aux premières observations concernant ces

phénomènes¹, disons que, en 1838, Michael Faraday (1791-1867) consacra les douzième, treizième et quatorzième séries de ses *Experimental Researches* aux décharges électriques dans les gaz, raréfiés ou non. Il effectua ainsi diverses observations qualitatives (lumière émise, étincelles, ...) et en particulier mit en évidence ce que nous appelons aujourd'hui l'*espace obscur* qui porte son nom (sans toutefois lui accorder grande importance). Toujours est-il que, limité par les performances des pompes à vide et des générateurs électrostatiques de hautes tensions d'alors², Faraday laissa temporairement ce sujet d'*investigation* en sommeil et ne s'y reconsuma que dix-neuf ans plus tard³.

Le premier progrès qui permit une avancée certaine dans le domaine des décharges en milieux raréfiés fut réalisé en 1851 quand l'électromécanicien allemand Heinrich Daniel Ruhmkorff (1803-1877), dirigeant alors une entreprise d'électrotechnique à Paris, réalisa et commercialisa une *bobine d'induction* délivrant sans peine de hautes tensions⁴ ([5] ; [9], pp. 238-253).

Le deuxième progrès important vint de Bonn en Allemagne : en 1854, Julius Plücker (1801-1868), professeur de physique dans l'Université de cette ville depuis 1847⁵ et travaillant justement sur les gaz raréfiés, s'attacha le savoir-faire de Heinrich Geissler (1814-1979) pour la réalisation de la verrière et des instruments dont il avait besoin. Ce fut ainsi que, sur les indications de Plücker, Geissler construisit les fameux tubes à décharge qui portent son nom, tubes contenant un gaz sous pression réduite, certains présentant une partie capillaire (1857)⁶. Que ces tubes soient du ressort de l'histoire qui nous occupent, c'est indéniable⁷ ; mais la contribution de Geissler fut surtout déterminante en ce qu'il avait inventé, deux ans plus tôt, une *pompe à déplacement de mercure* permettant de gagner au moins un facteur dix sur les «vides» que réalisaient les machines pneumatiques d'alors⁸. Quelques années plus tard, en 1865, un pas supplémentaire fut franchi en la... matière avec la *trompe à mercure* du physico-chimiste allemand Hermann Johann Philipp Sprengel (1834-1906), dispositif permettant d'atteindre des pressions inférieures au millième de torr. Ces progrès techniques sont d'importance, car ce fut essentiellement grâce à eux que les rayons cathodiques (et plus tard les rayons canaux et les rayons X) purent être isolés des multiples phénomènes accompagnant une décharge électrique⁹.

Ainsi, en 1858, Plücker observa «*au voisinage de la cathode, dans un tube de verre où le vide avait été poussé assez loin, une phosphorescence jaune-verdâtre*» et il remarqua que «*les tâches*

phosphorescentes changeaient de position lorsqu'on en approchait une aimant» (Thomson, [29], p. 620)¹⁰. Onze ans plus tard, après la mort du Plücker, l'un de ses élèves, Johann Wilhelm Hittorf (1824-1914), reprit son œuvre et nota : «*Quand la pression diminue, la lueur négative s'étend à l'espace environnant la cathode... Tout corps qui se trouve devant la cathode limite la lueur... Il n'y a jamais déviation de la ligne droite*» (cité dans [2], p. 132). Hittorf rapportait ainsi l'observation sur les parois du tube d'ombres nettes d'objets solides placés devant la cathode ; il en conclut à l'existence de «*rayons*» et observa que, dans un champ magnétique, ces rayons ont un comportement analogue à celui d'un courant électrique filiforme. Enfin, en 1876, le physicien allemand Eugen Goldstein (1850-1930) confirma les observations de Hittorf et donna à ces rayons le qualificatif de *cathodiques* puisque manifestement émis par la cathode du tube à décharge ; six ans plus tard, il crut montrer que ces rayons pouvaient être réfléchis par des obstacles solides¹¹ et en 1886, bénéficiant des progrès accomplis en technique du vide, il observa au voisinage d'une cathode percée de trous des *rayons positifs*, dits encore *rayons canaux*¹².

Parallèlement à ces approches expérimentales, les premières interprétations portant sur ces rayons virent rapidement le jour et se regroupèrent avec le temps autour de deux conceptions à l'antagonisme classique : la conception *corpusculaire* et la conception *ondulatoire*.

1.2. La conception corpusculaire

Le premier, semble-t-il, à avoir émis l'hypothèse que les rayons cathodiques étaient constitués de particules chargées fut l'anglais Cromwell Fleetwood Varley (1828-1883) qui, en 1871, l'utilisa pour expliquer le comportement des rayons cathodiques dans un champ électrique ou un champ magnétique ([3], p. 75). Mais ce fut principalement le physico-chimiste William Crookes (1832-1919) qui la défendit et la popularisa. A la tête d'un laboratoire privé londonien qu'il avait constitué en 1856 grâce à un important héritage, Crookes consacra une bonne part de son temps aux décharges électriques dès le début des années 1870. Ainsi, en 1874, il mit en évidence l'espace obscur qui porte son nom en utilisant la trompe à vide de Sprengel ; il constata par ailleurs qu'en dessous d'un centième de torr, il n'y a plus illumination de l'intérieur du tube, seule subsistant la phosphorescence des parois. En 1879, après avoir effectué une brillante série d'expériences, il conclut : «*Les phénomènes qui apparaissent dans ces tubes à vides révèlent à la science physique un monde nouveau - un monde où la matière existe sous un quatrième état... Par l'étude de ce quatrième*

état de la matière, il semble que nous avons enfin sous notre contrôle expérimental ces petites particules indivisibles qu'on suppose, selon toute vraisemblance, constituer la base physique de l'univers» (Crookes cité par Millikan, [15], pp. 49-50). L'expérience la plus... frappante permettant d'étayer la thèse de Crookes consistait en une petite roue à aubes pouvant se déplacer sur deux rails entre les électrons du tube à décharges : *«A chaque extrémité du tube, un peu au-dessus de l'axe, se trouve un pôle en aluminium, si bien que le courant de matière rayonnante... en rencontrant les pales supérieures de la petites roue à aubes, est suffisant pour mettre cette dernière en rotation et la mouvoir le long des rails. Quand j'inverse les pôles, je peux stopper la roue et la faire revenir sur le même chemin»* (Crookes cité dans [10], pp. 133-134). Deux ans après, en 1881, Joseph John Thomson (1856-1940) élaborait une première théorie de la dynamique des charges en mouvement ; il notait à ce propos : *«Dans les très intéressantes expériences exécutées récemment par M. Crookes et le docteur Goldstein sur les décharges électriques dans les gaz raréfiés, des particules de matière possédant une charge électrique considérable et se mouvant avec des vitesses très grandes constituent le fait essentiel»* (cité dans [2], p. 132). En 1890, sur la base d'études concernant les rayons cathodiques, le physicien anglais Arthur Schuster (1851-1934) donna une première évaluation - bien inférieure à la valeur connue actuellement - du rapport $\frac{e}{m}$ de la charge à la masse d'une entité élémentaire d'électricité ([15], p. 50). Enfin, en 1891, le physicien et astronome irlandais George Johnstone Stoney (1826-1911) proposa d'appeler l'hypothétique entité élémentaire d'électricité : *électron*¹³.

1.3. La conception ondulatoire

Bien qu'ayant fait certaines expériences analogues à celles de Crookes, Eugen Goldstein, déjà cité, inclinait à une nature ondulatoire des rayons cathodiques : le fait que ces rayons se «réfléchissent» sur des obstacles le conforta dans son opinion qui était partagée par nombre de physiciens germaniques dont Heinrich Hertz¹⁴. En 1883, ce dernier avait vingt-six ans et travaillait au Laboratoire de Physique de l'Université de Berlin où il effectua toute une série d'expériences concernant les décharges électriques qu'il rapporta dans un article intitulé : *«Versuche über die Glimmentladung (Recherches sur la décharge lumineuse)»* ([11]). Pour ces expériences, il construisit mille «*éléments de Planté*»¹⁵ qui, mis en série, lui permirent de réaliser

une source de haute tension *continue*. A la suite desdites expériences, il conclut :

– «jusqu'à preuve du contraire, nous devons considérer la décharge de la batterie comme continue, donc la décharge lumineuse comme non nécessairement disruptive,

– les rayons cathodiques ne sont qu'une manifestation accompagnant la décharge, mais à première vue n'ont rien à voir avec la conduction du courant,

– aucun caractère électrique ou magnétique, sinon à la rigueur très faible, ne doit être attribué aux rayons cathodiques... La lueur du gaz lors de la décharge lumineuse n'est pas une phosphorescence résultant de l'action directe du courant, mais de celle des rayons cathodiques provoqués par le courant. Ces rayons cathodiques sont électriquement indifférents, le phénomène s'en rapprochant le plus parmi les agents connus étant la lumière. La rotation du plan de polarisation de cette dernière est l'analogue de la courbure des rayons cathodiques par l'aimant» ([11], pp. 275-276).

Il est manifeste que Hertz avait la conviction ondulatoire chevillée au corps et si cette conviction l'aida - peut-être - à découvrir quatre ans plus tard les ondes qui immortalisèrent son nom, il faut bien reconnaître, *a posteriori* bien sûr, qu'elle fut un handicap pour interpréter la nature des rayons cathodiques. Ne serait-ce que pour comparaison avec l'expérience de Perrin, nous avons reproduit en figure 1 le dispositif utilisé par Hertz pour déterminer le transport éventuel d'une charge électrique par les rayons cathodiques : le cylindre de Faraday étant disposé à l'extérieur du tube à décharge, il est aisé de comprendre - aujourd'hui - pourquoi le test ne pouvait être que négatif. En 1892, Hertz montra que les rayons cathodiques peuvent traverser de très fines fenêtres de métal tout comme la lumière peut traverser des couches d'or d'épaisseur microscopique ([12]). Rapprochant ce fait de la «réflexion» de ces rayons rapportée dix ans plus tôt par Goldstein, Hertz n'en fut que plus convaincu de leur caractère ondulatoire. Deux ans plus tard, l'un de ses élèves, Philipp Lenard (1862-1947), réalisait des fenêtres en aluminium de trois micromètres d'épaisseur afin de pouvoir étudier les rayons cathodiques à l'extérieur du tube. Cependant ces rayons étaient rapidement dispersés dans l'air «sous la forme d'une houppe très diffuse, ne s'étendant pas au-delà de quelques centimètres» ([30], p. 133)¹⁶.

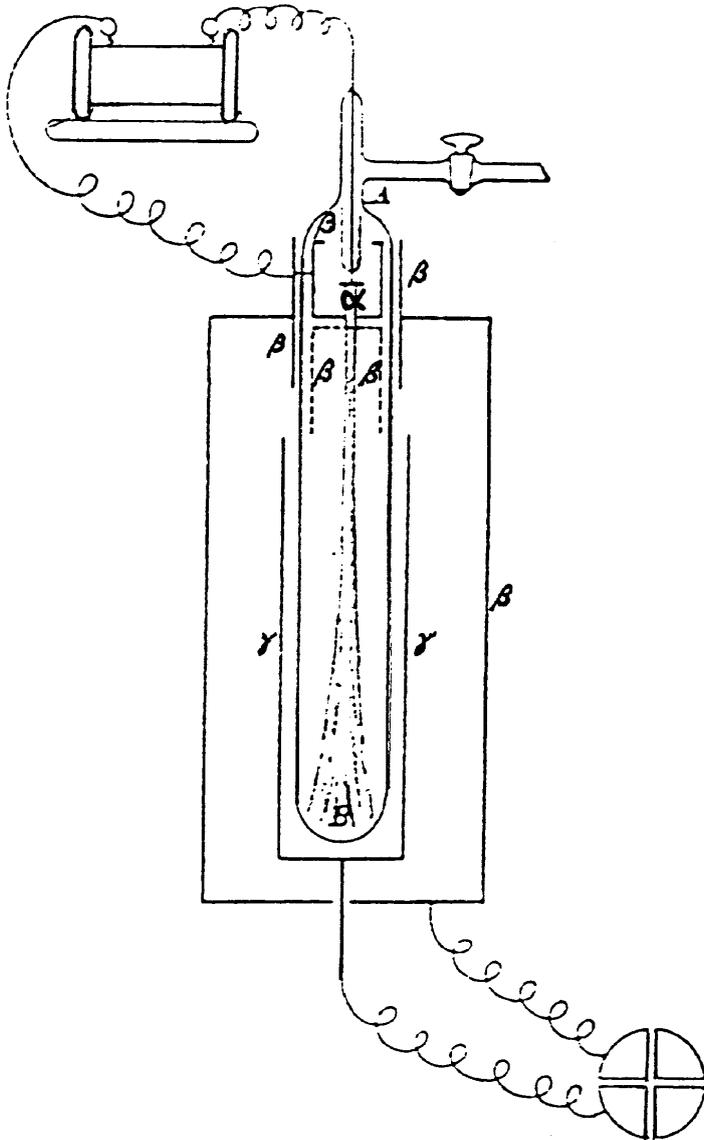


Figure 1 : Dispositif expérimental de Hertz pour tester le caractère électrique des rayons cathodiques. Le tube mesure 25 cm de long et 2,5 cm de large. Il est alimenté par une petite bobine d'induction. α est la cathode, β l'ensemble anodique, γ le cylindre de Faraday relié à un électromètre de Kelvin.

Ainsi, en 1895, le débat sur la nature des rayons cathodiques était loin d'être tranché. Or, l'objet de ce débat était d'importance puisqu'il s'inscrivait dans celui plus large et fondamental concernant la nature même de l'électricité. Nous y reviendrons.

2. L'EXPÉRIENCE DE PERRIN

Ce fut à la fois au laboratoire de l'École Normale Supérieure et dans celui de Henri Pellat à la Sorbonne que Jean Perrin¹⁷, alors âgé de vingt-cinq ans, réalisa les expériences qui suivent, expériences dont il fit part à l'Académie des Sciences dans une note de quatre pages, datée donc du 30 décembre 1895 (document [18]).

Dans cette note, Perrin commence par rappeler les deux thèses en présence concernant les rayons cathodiques et indique que l'hypothèse de Crookes et J.-J. Thomson lui a suggéré les expériences qu'il a effectuées. Prenant acte de ce que l'électrisation des rayons cathodiques n'avait pas été constatée directement, Perrin décrit alors le «*tube à vide*» réalisé pour ce faire, tube représenté ici en figure 2. Il ne précise pas la source de hautes tensions alimentant la tube, ni le procédé permettant de «*faire le vide*» ; il est fort probable que la première était une bobine d'induction et que le second permettait d'atteindre une pression comprise entre un centième et un millième de torr afin de limiter au mieux les manifestations parasites des gaz résiduels.

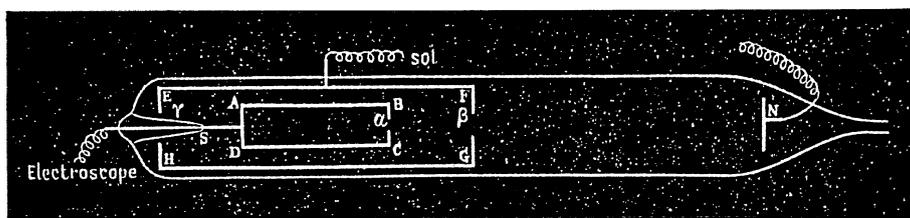


Figure 2 : Tube à vide utilisé par Jean Perrin.

ABCD est un cylindre métallique ouvert en α , jouant le rôle de cylindre de Faraday, relié à un électroscope par un fil soudé en S. Le cylindre EFGH ouvert en β et γ , relié en permanence au sol, permet d'isoler le premier cylindre des influences extérieures. L'électrode N est à environ 10 cm de β . L'évacuation du gaz se fait par l'ouverture à droite de N.

Viennent alors les expériences proprement dites. Lorsque l'électrode N est portée à un potentiel négatif, jouant ainsi le rôle de cathode,

le cylindre EFGH joue celui d'anode : les rayons cathodiques se dirigent donc de N vers le cylindre de Faraday ABCD qui «*invariablement*» se charge d'électricité négative. En plaçant le système dans un champ magnétique de façon à dévier les rayons cathodiques pour qu'ils n'entrent pas dans le cylindre ABCD, ce dernier ne se charge plus ce qui permet à Perrin de conclure : «*Bref, le cylindre de Faraday se charge négativement quand les rayons cathodiques y pénètrent, et seulement quand ils y pénètrent* : les rayons cathodiques sont donc chargés d'électricité négative» (c'est Perrin qui souligne).

Après avoir donné une évaluation de l'électricité transportée par les rayons cathodiques, Perrin note alors : «*Les rayons cathodiques étant chargés négativement, le principe de la conservation de l'électricité porte à rechercher quelque part les charges positives correspondantes. Je crois les avoir trouvées dans la région même où se forment les rayons cathodiques, et avoir constaté qu'elles cheminent en sens inverse (des rayons cathodiques), en se précipitant sur la cathode*». Pour vérifier cela, il inverse le rôle des électrodes, N jouant le rôle d'anode, EFGH celui de cathode : le cylindre de Faraday se charge effectivement positivement d'une charge de l'ordre de grandeur de celle obtenue précédemment avec les rayons cathodiques.

Perrin réalise ensuite une autre expérience où, à l'intérieur du tube EFGH, se trouve un second diaphragme β' en face de α , ce qui lui permet de montrer que le système des rayons positifs n'est pas symétrique de celui des rayons cathodiques.

D'où la conclusion finale de Perrin : «*L'ensemble de ces résultats ne paraît pas facilement conciliable avec la théorie qui fait des rayons cathodiques une lumière ultra-violette. Ils s'accordent bien au contraire avec la théorie qui en fait un rayonnement matériel et qu'on pourrait, me semble-t-il, énoncer actuellement ainsi : au voisinage de la cathode, le champ électrique est assez intense pour briser en morceaux, en ions, certaines des molécules du gaz restant. Les ions négatifs partent vers la région où le potentiel croît, acquièrent une vitesse considérable et forment les rayons cathodiques ; leur charge électrique et, par suite, leur masse (à raison d'une valence-gramme pour 100 000 coulombs¹⁸) est facilement mesurable. Les ions positifs se meuvent en sens inverse ; ils forment une houppe diffuse, sensible à l'aimant, et pas de rayonnement proprement dit*».

3. QUELQUES COMMENTAIRES

3.1. De l'expérience brute...

En définitive, que montre l'expérience de Perrin ? Que les rayons cathodiques transportent de l'électricité négative, ce qui infirme du même coup les conclusions de Hertz sur cette question. Mais, il n'y est aucunement fait preuve que ces rayons sont constitués de charges électriques négatives *discrètes*, encore moins de particules élémentaires universelles, pour la simple et bonne raison que l'inertie (alors hypothétique) des rayons cathodiques n'y est pas exploitée. Il faudra en effet attendre au moins 1897 et les expériences de J.-J. Thomson - méthode dite des champs croisés - pour constater que le rapport $\frac{e}{m}$ mesuré à partir des rayons cathodiques est indépendant de la nature de la cathode et du gaz résiduel se trouvant dans le tube à vide. Ce rapport étant de surcroît beaucoup plus grand que celui mesuré pour les ions par voie électrolytique, ce sont les résultats de Thomson qui imposèrent véritablement l'idée que les rayons cathodiques sont constitués de particules *universelles* bien plus légères que les ions connus.

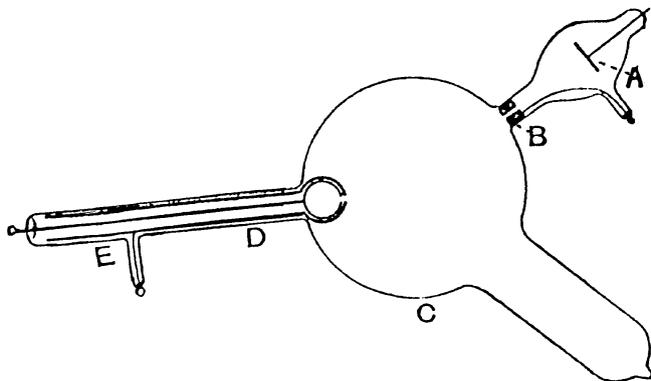


Figure 3 : Tube conçu par J.-J. Thomson pour réaliser l'expérience de Perrin. Le premier schéma de ce tube apparut dans le *Philosophical Magazine* en 1897. Le présent schéma provient de [29], p. 629. A est la cathode, B est l'anode reliée à la terre tout comme le cylindre extérieur D, le cylindre E est isolé et relié à un électromètre. Pour pénétrer dans E, les rayons cathodiques sont incurvés à l'aide d'un aimant.

Il y a donc loin des expériences qualitatives de Perrin à l'électron tel que nous le pratiquons aujourd'hui¹⁹ ; il n'en reste pas moins que, comme l'écrit Emilio Segré, ces expériences «*ouvrirent la voie aux progrès ultérieurs*» ([27], p. 25).

3.2. ... et de son interprétation

D'où vient alors qu'il n'est pas rare de lire, par exemple, que «*Jean Perrin démontre de manière définitive en 1895 que les rayons cathodiques sont formés de particules d'électricité négative*» ([2], p. 140) ? Probablement de ce que Perrin réalisa cette expérience en privilégeant de fait la thèse corpusculaire - n'oublions pas que l'hypothèse de Crookes et Thomson lui suggéra les expériences précédentes - et surtout de ce qu'il *interpréta* son expérience en ces termes²⁰. Selon lui, les rayons cathodiques pourraient être constitués d'*ions*, tout comme les rayons positifs à l'origine des *rayons canaux*²¹. En montrant l'asymétrie entre les rayons positifs et les rayons cathodiques, Perrin soulignait d'ailleurs qualitativement leur différence de constitution ; si les rayons cathodiques sont homogènes - et il sera montré plus tard qu'ils sont constitués d'un faisceau pratiquement monocinétique d'électrons -, les rayons positifs sont eux extrêmement inhomogènes - étant composés de divers ions aux vitesses différentes. Or, que Perrin ait d'emblée proposé une interprétation ionique montre à l'évidence qu'il fut, dès le début de sa carrière, un atomiste convaincu. Pourtant, en 1895, la conception atomique de la matière était loin de faire l'unanimité chez les physiciens. S'il était question d'*atomes* en chimie ou de *molécules* dans les gaz ou en cristallographie à cette époque, ces concepts n'étaient bien souvent utilisés que comme outils ou simples représentations auxquels nombre de physiciens déniaient encore toute réalité²². Même les plus prédisposés à croire à cette réalité se montraient prudents. Ainsi, toujours en 1895, le physicien autrichien Ludwig Boltzmann (1844-1906), héraut de la mécanique statistique, n'écrivait-il pas dans la première partie de ses *Leçons sur la théorie des gaz* : «*En présentant la théorie des gaz comme un ensemble d'analogies mécaniques, nous indiquons déjà, par le choix de cette expression, combien nous sommes éloignés d'admettre, d'une façon ferme et comme une réalité, que les corps sont en tous leurs points composés de très petites particules*» ([4], p. 4). Et dans l'introduction de la deuxième partie de ses *Leçons* écrite en 1898, Boltzmann parle de l'*«hostilité générale»* que rencontre sa théorie, cette hostilité - qui n'était pas si générale que ça - trouvant en grande partie sa source dans le refus de la *réalité* atomique.

Il est vrai qu'en 1895, les faits n'étaient pas suffisamment patents pour étayer cette réalité, d'autant qu'il était exclu d'observer directement atomes et molécules. Mais nous savons que les quinze années qui suivirent allaient voir s'accumuler les théories et les expériences établissant indirectement l'objectivité de leur existence ; nous savons aussi quel rôle éminent eut Jean Perrin dans ce processus de validation

de l'hypothèse atomique. A titre de curiosité, nous citons en annexe de larges extraits d'une conférence qu'il prononça en 1901 ([19]) - donc bien avant la publication des *Atomes* en 1913 - où il expose le pourquoi de ses convictions atomistes : une occasion de montrer d'une part que l'expérience de 1895 et ses suites sont loin d'être étrangères à l'histoire de l'atome et d'autre part que le modèle de l'atome planétaire qu'Ernest Rutherford (1871-1937) proposa en 1911 sur la base de ses expériences de diffusion des rayons α eut un sérieux précurseur qualitatif avec le modèle de Perrin.

3.3. Expérience de Perrin et historique de l'électricité

Enfin, il y a quelque banalité à dire que, du fait qu'elle permit d'élucider le caractère électrique des rayons cathodiques, l'expérience de Perrin tient une place non négligeable dans l'histoire de l'électricité. En effet, en 1895, la nature de l'électricité restait l'objet de nombreuses interrogations et recherches. A titre indicatif, le mot *électron*, qui n'était encore que peu usité, ne désignait alors que la charge élémentaire (encore hypothétique), et non, comme aujourd'hui, une particule²³ ; et tous n'adhéraient pas, peu s'en faut, à l'idée d'une structure quantifiée de l'électricité. La nature du courant électrique n'était quant à elle pas encore totalement clarifiée et surtout unifiée : il faudra attendre 1900 et la théorie de la conduction électronique dans les métaux du physicien allemand Paul Drude (1863-1906) pour avoir un cadre théorique relativement satisfaisant permettant d'identifier le courant électrique dans un conducteur à une *convection* de particules chargées (cf. [8])²⁴.

De plus, en 1896, peu après l'expérience de Perrin, le hollandais Pieter Zeeman (1865-1943) montra qu'il y a décomposition des raies spectrales sous l'action d'un champ magnétique ; quatre ans plus tôt, son compatriote Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) avait de fait théoriquement prévu cet effet en étudiant l'influence d'un champ magnétique sur un modèle d'atome constitué d'une partie fixe et d'un ion négatif soumis à une force de rappel, ce qui lui permit, dès la fin de l'année 1896, d'évaluer le rapport $\frac{e}{m}$ relatif à cet ion à partir des mesures de Zeeman ([14], pp. 2-5 ; [6], pp. 123-125) ; [28], tome 3-2, p. 255). Mais, il faudra encore exploiter bien d'autres phénomènes - les rayons cathodiques bien sûr, l'électricité émise par l'effet photoélectrique découvert par Hertz en 1887, l'effet thermoionique, les rayons de Lenard, ceux que Henri Becquerel (1852-1908) découvrit cette même année 1896 et qui furent plus précisément étudiés par Rutherford en

1899, etc. - pour qu'enfin trouve droit de cité en physique cet électron qui aujourd'hui fait partie de notre quotidien.

ÉPILOGUE

Au début du mois de janvier 1896, Jean Perrin eut connaissance de la découverte des rayons X... par la presse quotidienne. Sur les vagues indications données par les journaux, il effectua un certain nombre d'expériences et d'observations qu'il exposa dans une première note à l'Académie des Sciences le 27 janvier. Le travail de décembre 1895 ainsi que ses recherches sur les rayons X firent l'objet de sa Thèse de doctorat, intitulée *Rayons cathodiques et rayons de Röntgen*, qu'il soutint devant la faculté des Sciences de Paris le 14 juin 1897. Le 3 mars 1898, il fut nommé chargé de cours de Chimie-Physique à la Sorbonne... en particulier aux dépens de Pierre Curie (1859-1906) de onze ans son aîné qui postulait au même poste : cela n'empêcha pas que se tissent entre eux de très forts liens d'amitié ([13], pp. 115-117).

Quant aux rayons cathodiques, nous avons vu que l'expérience de Perrin leur redonna une nouvelle jeunesse en établissant leur nature électrique et qu'en 1897, les expériences de J.-J. Thomson furent une étape décisive dans l'élaboration du concept d'électron en tant que particule. Or, cette même année 1897, ce fut en modifiant quelque peu la structure des tubes à rayons cathodiques et en utilisant le fait que ces rayons sont chargés électriquement que le physicien allemand Karl Ferdinand Braun (1850-1918), prix Nobel de Physique 1909, inventa l'un des outils les plus utiles de nos laboratoires : l'*oscillographe cathodique*.

Annexe

***Extraits de «Les hypothèses moléculaires» ([19])
Conférence de Jean Perrin faite le 16 février 1901
devant les Étudiants et Amis de l'Université de Paris***

Sur l'«hypothèse des molécules» : «Supposons qu'on aperçoive dans la campagne une tache blanche, éloignée, pouvant se diviser sous des influences quelconques en taches d'aspect semblable, mais plus petites. On fera une hypothèse moléculaire en supposant que cette tache est en réalité un troupeau de moutons. Le mouton est ainsi le terme extrême jusqu'auquel on peut pousser la division du troupeau... Cela ne veut pas dire qu'un mouton n'est pas divisible en parties plus petites, mais seulement que, pour le diviser, il faudra s'y prendre autrement que pour subdiviser le troupeau et que les phénomènes observés deviendront tout différents» (p. 11).

Après avoir rappelé son expérience de 1895, ainsi que celles de J.-J. Thomson et de quelques autres, Perrin donne sa conception de l'atome : «Ainsi nous savons partager un atome en deux morceaux ; mais les deux morceaux ne sont pas de taille comparable et l'un d'eux, le corpuscule²⁵, est très petit par rapport à l'atome. De même, nous partageons une maison en deux quand nous en enlevons une pierre, ou un gros livre en deux quand nous en déchirons une page... Ce qu'il est essentiel de remarquer, c'est que les corpuscules négatifs paraissent toujours identiques entre eux, quelle que soit la nature chimique de l'atome dont on le détache... Pour la première fois, nous entrevoyons un moyen de pénétrer dans la constitution intime de l'atome. On fera, par exemple, l'hypothèse suivante, qui concorde avec les faits... Chaque atome serait constitué, d'une part, par une ou plusieurs masses très fortement chargées d'électricité positive, sorte de soleils positifs dont la charge serait très supérieure à celle d'un corpuscule, et d'autre part, par une multitude de corpuscules, sorte de petites planètes négatives, l'ensemble de ces masses gravitant sous l'action des forces électriques, et la charge négative totale équivalant exactement à la charge positive totale (des soleils), en sorte que l'atome soit électriquement neutre... Si une force électrique suffisante agit sur un atome, elle pourra détacher une des petites planètes, un corpuscule (formation de rayons cathodi-

ques)... *L'atome apparaît ainsi comme un tout gigantesque, dont la mécanique intérieure aurait pour base les lois fondamentales des actions électriques. La durée de gravitation des différentes masses intérieures à l'atome correspondraient peut-être aux différentes longueurs d'onde des lumières que manifestent les raies du spectre d'émission... Si l'atome est très lourd, c'est-à-dire probablement très grand, le corpuscule le plus éloigné du centre, - le Neptune du système - sera mal retenu dans sa course dans l'attraction électrique du reste de l'atome ; la moindre cause l'en détachera ; la formation de rayons cathodiques pourra devenir tellement facile que la matière paraisse spontanément radioactive...» (pp. 38-41).*

L'atome planétaire de Perrin, tout comme celui de Rutherford d'ailleurs, si séduisant soit-il, pêche cependant par deux vices rédhibitoires : d'une part, les *planètes négatives*, étant accélérées de par leur mouvement orbital, devraient en permanence émettre de l'énergie électromagnétique et donc ce précipiter sur les centres attracteurs ; d'autre part, quelle force faut-il invoquer pour assurer la cohésion des charges positives à l'intérieur de l'atome ? La réponse à ces deux questions accompagnera l'émergence de la mécanique quantique et de la physique nucléaire... Mais ça, c'est une autre histoire...

BIBLIOGRAPHIE

- [1] «*Les Atomes, une anthologie historique*», textes choisis et commentés par B. BENSUADE-VINCENT et C. KOUNELIS, Presses Pocket - Paris, 1991.
- [2] E. BAUER : «*L'électromagnétisme hier et aujourd'hui*», Albin Michel - Paris, 1949.
- [3] W. BEIER : «*Wilhelm Conrad Röntgen*», Teubner - Leipzig, 1995.
- [4] L. BOLTZMANN, «*Leçons sur la théorie des gaz*», traduit par A. GALLOTTI, Gauthier Villars - Paris, 1902 pour la première partie, 1905 pour la seconde (*fac simile* : Gabay - Paris, 1987).
- [5] A. BORDEAUX : «*Histoire des sciences au XIX^e siècle*», Béranger - Paris Liège, 1920.
- [6] N.-R. CAMPBELL : «*La théorie électrique moderne*», théorie électronique, Hermann - Paris, 1919.
- [7] 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.
- [8] P. DRUDE : «*Théorie de la dispersion dans les métaux fondée sur la considération des électrons*», in Rapports présentés au Congrès international de physique de 1900, Gauthier Villars - Paris, 1900, pp. 34-46.
- [9] Th. DU MONCEL : «*Exposé des applications de l'électricité*», tome II, Lacroix - Paris, 1873.
- [10] A. FÖLSING : «*Wilhelm Conrad Röntgen, Aufbruch ins Innere der Materie*», Hanser - Munich, 1995.
- [11] H. HERTZ : «*Versuche über die Glimmentladung*», Wiedemann's Annalen der Physik und Chemie, XIX, 1883, pp. 782-816 ; in *Gesammelte Werke von Heinrich Hertz*, Tome I, J.A. Barth - Leipzig, 1894, pp. 242-276.
- [12] H. HERTZ : «*Über den Durchgang der Kathodenstrahlen durch dünne Metallschichten*», Wiedemann's Annalen der Physik und Chemie, XLV, 1892, pp. 28-32 ; in *Gesammelte Werke von Heinrich Hertz*, Tome I, J.A. Barth - Leipzig, 1894, pp. 355-359.
- [13] A. HURWIC : «*Pierre Curie*», Flammarion - Paris, 1995.
- [14] H.-A. LORENTZ : «*Théorie des phénomènes magnéto-optiques récemment découverts*», in Rapports présentés au Congrès inter-

- national de physique de 1900, Gauthier Villars - Paris, 1900, pp. 1-33.
- [15] R.-A. MILLIKAN : «*L'électron*», Félix Alcan - Paris, 1926.
- [16] J. NICOLLE : «*Wilhelm Conrad Röntgen et l'ère des rayons X*», Seghers - Paris, 1965.
- [17] L. PEARCE WILLIAMS, «*Michael Faraday*», Da Capo Press - New York, 1965.
- [18] J. PERRIN, «*Nouvelles propriétés des rayons cathodiques*», Comptes-rendus des séances de l'Académie des Sciences, CXXI, 30 décembre 1895, p. 1130.
- [19] J. PERRIN : «*Les hypothèses moléculaires*», Revue scientifique du 13 avril 1901.
- [20] J. PERRIN : «*Les atomes*», Gallimard - Paris, 1970 (première édition : 1913).
- [21] H. POINCARÉ, «*La science et l'Hypothèse*», Flammarion - Paris, 1968 (première édition 1902).
- [22] H. POINCARÉ, «*L'analyse et la recherche*», textes choisis et commentés par G. RAMUNNI, Hermann - Paris, 1991.
- [23] A. ROMER : «*La découverte de l'atome*», Payot - Paris, 1962.
- [24] J. ROSMORDUC : «*Une histoire de la physique et de la chimie, de Thalès à Einstein*», Seuil Points Sciences - Paris, 1985.
- [25] J. ROSMORDUC et al. : «*Histoire de la physique, la formation de la physique classique*», Tec et Doc Lavoisier - Paris, 1987.
- [26] E. SEGRÉ : «*Les physiciens classiques et leurs découvertes, de la chute des corps aux ondes hertziennes*», Fayard - Paris, 1987.
- [27] E. SEGRÉ : «*Les physiciens modernes et leurs découvertes, des rayons X aux quarks*», Fayard - Paris, 1984.
- [28] 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.
- [29] J.-J. THOMSON : «*Passage de l'électricité à travers les gaz*», Gauthier Villars - Paris, 1912, traduction de R. FRIC et A. FAURE de *Conduction of Electricity through Gases*, Cambridge University Press, 1906.
- [30] P. VILLARS : «*Les rayons cathodiques*», in Rapports présentés au Congrès international de physique de 1900, Gauthier Villars - Paris, 1900, pp. 115-137.

Nous avons également consulté :

- G. BRUHAT : «*Cours d'électricité*», Masson - Paris, 1929.
- H. PELLAT : «*Cours d'électricité*», Tome I, Gauthier Villars - Paris, 1901.
- «*Inventeurs et Scientifiques, dictionnaire de bibliographies*», Larousse - Paris, 1994.
- ainsi que divers articles de l'*Encyclopie Universalis*.

NOTES

1. Pour les premières observations sur les décharges électriques en gaz raréfiés, voir [28], tomes 2 et 3-1, ainsi que notre article sur le centenaire de la découverte des rayons X, B.U.P. n° 779.
2. A noter que la première pompe à vide (1650) et la première machine électrostatique (1672) furent inventées par un même homme : Otto von Guericke (1602-1686).
3. La racine *cathod* apparaissant dans le qualificatif des rayons faisant l'objet de notre propos, rappelons que c'est ce même Faraday qui, en 1834 (et non 1838 comme il est indiqué dans le *Petit Robert*), aidé de philologues distingués, forgea le terme *cathode* à partir des racines grecques $\omicron\delta\omicron\varsigma$ et $\kappa\alpha\tau\alpha$ signifiant respectivement *chemin* et *vers le bas*. Concomitamment, Faraday définit l'*anode* (pour *chemin vers le haut*), les *électrodes* (pour *chemins de l'électricité*) et les *ions* (à partir d'un participe présent de verbe grec signifiant *se dirigeant vers*) ([17], pp. 257-269).
4. A noter, sans chauvinisme aucun, que l'appellation «Rühmkorff» désigne ici plus une marque qu'un concepteur puisque Rühmkorff s'inspira, en la perfectionnant, de la bobine réalisée quelque dix ans plus tôt par les physiciens inventeurs français Antoine Masson (1806-1860) et Louis Breguet (1804-1883), ce dernier étant le grand-père de l'avionneur bien connu.
5. En fait, il avait commencé sa carrière comme mathématicien et se fit connaître par d'importants travaux en géométrie analytique (formules de Plücker, classification des courbes algébriques, ...).
6. De par l'analyse qu'il fit de la lumière émise par ces tubes au niveau de la partie capillaire, Plücker peut également être considéré comme l'un des précurseurs de l'analyse spectrale dont les principes furent établis en 1859 par Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) et Robert Wilhelm Bunsen (1811-1899).

7. Il ne s'agit pas tant des tubes proprement dits que des procédés de soudure métal-verre inventés par Geissler limitant le risque de fuite dans lesdits tubes. John Peter Gassiot (1797-1877) fut le premier en Angleterre à reproduire les tubes de Geissler, ce qui permit à Faraday de reprendre ses études sur les décharges en milieux raréfiés dès 1857 ([17], pp. 475-476).
8. En 1838 par exemple, Faraday ne pouvait au mieux obtenir que des pressions de l'ordre du torr, soit 1 mm de mercure ou 133,32 Pa. La pompe de Geissler permettait d'atteindre le dixième de torr. Elle fut perfectionnée par le physicien autrichien August Töpler.
9. A titre indicatif, les décharges électriques dans les gaz prennent l'aspect suivant selon la pression : pour la pression atmosphérique normale (sept cent soixante torrs), il y a étincelles et arc électrique. Pour une pression d'une dizaine de torrs, nous pouvons observer une colonne lumineuse dite «colonne positive» dans tout le volume du tube. Pour une pression de l'ordre du torr, la colonne positive se stratifie, la cathode s'enveloppe d'une lueur bleuâtre («lumière négative»), ces deux «lumières» étant séparées par l'espace obscur de Faraday. Pour une pression de un dixième de torr, un second espace obscur (dit de Crookes) apparaît entre la cathode et la lumière négative. Pour que les rayons cathodiques puissent être étudiés sans difficulté, il faut que la pression soit inférieure à un dixième, et mieux, à un centième de torr (d'après [29], pp. 527-529 et [16], p. 47).
10. Selon la constitution du verre, la phosphorescence peut être verdâtre (verres calciques) ou bleuâtre (verres au plomb) ([23], pp. 15-16 ; [29], p. 621).
11. Il s'agit en fait d'une émission secondaire de rayons cathodiques et non d'une réflexion au sens optique du terme.
12. Pour avoir une vue exhaustive sur les décharges électriques en milieu gazeux, il est on ne peut plus instructif de consulter la «bible» de J.-J. Thomson consacrée à cette question ([29]). Sur les propriétés physiques des rayons cathodiques, outre l'ouvrage précédent, voir l'article [30] de Paul Ulrich Villard (1860-1934), physicien français qui, en particulier, identifia parmi les rayonnements émis par les corps radioactifs, des rayons analogues aux rayons X, mais plus pénétrants encore : les rayons γ (1900).
13. Le champ d'études de Stoney concernait essentiellement les phénomènes électrolytiques. Rappelons qu'électron vient du mot

grec $\eta\lambda\epsilon\kappa\tau\rho\upsilon$ signifiant *ambre jaune* à savoir la matière que Thalès par exemple frottait pour attirer des objets légers. Ce fut l'anglais William Gilbert (1544-1603) qui, dans le premier traité d'électricité et de magnétisme digne de ce nom, le *De Magnete* (Dover - New York, 1958), introduisit *vis electrica* pour «effet électrique».

14. Sur l'œuvre de Hertz, voir par exemple [26], pp. 207-214, ainsi que l'excellent numéro 30 des *Cahiers de Sciences et Vie* (décembre 1995).
15. A savoir les accumulateurs au plomb inventés par Gaston Planté (1834-1889) en 1860.
16. Sur les propriétés des rayons cathodiques à l'extérieur du tube, voir par exemple Coolidge et Moore, [7].
17. Après l'expérience dont il est question ici et qui le fit connaître à la communauté des physiciens, Jean Perrin travailla sur l'ionisation des gaz par les rayons X. De 1904 à 1906, il étudia l'électrisation de contact, les colloïdes et les hydrates et surtout il se consacra de 1908 à 1910 à l'étude du mouvement brownien et apporta diverses preuves de la réalité des atomes par des déterminations convergentes du nombre d'Avogadro par exemple. L'ouvrage qu'il écrivit en 1912 et qui s'intitule justement «*Les atomes*» ([20]) fit beaucoup pour balayer les derniers doutes sur la réalité de ceux-ci. Après la première guerre mondiale, il travailla sur l'influence de la lumière dans les réactions chimiques et rendit compte du rayonnement émis par le soleil. Il reçut le prix Nobel de physique en 1926. Sous-secrétaire d'état à la recherche scientifique dans le gouvernement de Léon Blum en 1936, il participa activement à la création du CNRS et décida celle du Palais de la Découverte à Paris. Durant la seconde guerre mondiale, il émigra aux U.S.A. où il mourut à New York en 1942, à l'âge de soixante-douze ans. Il est enterré au Panthéon, aux côtés de Langevin.
18. A savoir nos $96\,484,6\text{ C/mol}$ d'aujourd'hui.
19. En 1913, N.-R. Campbell, ardent promoteur de la théorie électronique, restait quelque peu réservé sur l'expérience de Perrin, disant seulement qu'elle avait «*paru concluante*», ajoutant en note : «*Si l'on avait eu alors nos connaissances actuelles sur la radiation secondaire, l'expérience de Perrin eût pu paraître moins convaincante. Mais je crains que peu des "expériences cruciales" de l'histoire de la physique puissent résister à un examen critique fait à la lumière des connaissances nouvelles*» ([6], p. 123). Le

rayonnement secondaire dont parle Campbell est le rayonnement cathodique provoqué par les rayons X résultant de l'interaction entre rayons cathodiques primaires et parois.

20. Et, il ne s'agit que d'une interprétation ; si effectivement l'hypothèse ondulatoire devenait difficilement tenable, il était après tout possible d'invoquer un fluide matériel continu.
21. Wilhelm Giese avait étendu la théorie ionique des électrolytes aux gaz dès 1882. Il est à noter qu'à aucun moment Perrin ne parle d'électron ; le contraire aurait été inattendu pour l'époque.
22. Le mot *molécule*, dérivé du mot latin *moles* signifiant *masse* flanqué du suffixe diminutif *-cula*, désignait alors une entité élémentaire et pouvait de ce fait recouvrir des significations différentes selon le domaine où il était utilisé. Sur l'histoire de la conception atomique, nous pouvons conseiller l'intéressant recueil de textes [1], ainsi que, par exemple, [24], pp. 200-208, et [25], pp. 251-280.
23. Jusqu'en 1913 au moins, J.-J. Thomson - à qui pourtant notre électron doit tant - n'utilise pas ce vocable pour désigner une particule, mais parle plutôt d'*ion* ou de *corpuscule* ([6], p. 124, [15], pp. 30-33).
24. Et encore ! Les expériences de Victor Crémieu en 1901 jetèrent une doute passager sur cette identification en semblant invalider la célèbre expérience de l'américain Henry Augustus Rowland (1848-1901) ; cf. les passionnants développants donnés par Poincaré sur cette question et sur la contreverse «*courants ouverts - courants fermés*» ([21], pp. 227-243 ; [22], pp. 157-193).
25. Perrin, tout comme Thomson, n'utilise pas le mot *électron* mais *corpuscule*.