
Bulletin de l'Union des Physiciens

Association des professeurs de Physique et de Chimie

Bref historique de l'émergence du concept d'électron

par Pierre FRÉCHENGUES et Jean-Michel DUSSEAU
Laboratoire ERES de l'Université MONTPELLIER II

Groupe I.U.F.M.
2, place M. Godechot, B.P. 4152
34092 MONTPELLIER Cedex

RÉSUMÉ

Dans cet article nous parcourons le long cheminement tant théorique qu'expérimental qui a conduit au concept d'électron tel qu'il est accepté aujourd'hui par la communauté scientifique. Nous essayons de mettre en évidence que s'il existe parfois des avancées significatives, aucune ne peut être considérée comme cruciale ou définitive.

En 1997, la célébration du «centenaire» de la découverte de l'électron par J.-J. Thompson telle, par exemple, celle publiée par le journal *Le Monde* [1] nous semble éloignée de ce que l'on pourrait présenter en classe, tant l'histoire de cette particule élémentaire ne peut se résumer à une seule expérience.

A un moment où le problème récurrent de l'introduction de l'histoire des sciences dans l'enseignement est à nouveau posé [2], nous proposons à la fois l'histoire de l'émergence d'un concept et l'histoire de son introduction dans l'enseignement [3].

1. LES SOMNAMBULES

L'histoire de l'électron ne peut pas être séparée de celle de la structure de la matière, elle en constitue plutôt un prolongement. Nous n'aborderons pas ici les aspects philosophiques de la théorie atomique, dont Démocrite constitue un des premiers partisans. On peut considérer que la théorie atomique, d'un point de vue scientifique, prend naissance au début du XIX^e, lorsque Dalton suppose que chaque substance est faite de particules identiques et indivisibles qu'il appelle des atomes, ce vocable confondant atomes et molécules. Cependant, si cette théorie explique bien les discontinuités chimiques, elle se trouve en désaccord avec les lois de Gay-Lussac, qui prévoient que «les volumes de gaz qui se combinent sont dans des rapports simples et que le volume de la combinaison formée est aussi dans un rapport simple avec la somme des volumes de gaz composants » [4]. Avogadro lève la difficulté en avançant l'hypothèse que «les molécules constituantes d'un gaz simple quelconque [...] ne sont pas formées d'une seule molécule élémentaire, mais résultent d'un certain nombre de ces molécules réunies en une seule par attraction et que lorsque des molécules d'une autre substance doivent se joindre à celles-là pour former des molécules composées, la molécule intégrante qui devrait en résulter se partage en deux ou plusieurs parties» [4].

Cette théorie corpusculaire commence à réellement prendre corps quand Joule détermine vers 1850 la vitesse moyenne avec laquelle voyagent, à la température ordinaire, les molécules gazeuses d'une espèce donnée, et lorsque Maxwell calcule en 1860 le libre parcours moyen d'une molécule, même si des savants aussi prestigieux que Dumas («Si j'en étais le maître, j'effacerais le mot atome de la science, persuadé qu'il va plus loin que l'expérience » [5]), Duhem ou Ostwald refusent d'adhérer à cette théorie. Ostwald finit par se convertir vers 1910, et écrit peu après : «On a démontré de nos jours la justesse de la théorie atomique de l'électricité et cette théorie a pris une importance beaucoup plus grande qu'on ne pouvait le prévoir. Aujourd'hui plusieurs savants éminents regardent l'atome électrique, ou électron, comme le dernier reste réel auquel conduit non seulement l'analyse des phénomènes électriques, mais aussi celle de la lumière, et même de tous les corps pondérables. En d'autres termes, ils considèrent le monde physique tout entier comme constitué par des électrons » [6].

Comment en est-on arrivé là ?

Vers 1880, les savants pour qui l'existence des atomes n'est plus mise en doute, cherchent alors à accumuler les données précises sur les molécules et les atomes. Il semble normal que parallèlement à la progression des idées vers une structure granulaire de la matière, soit émise l'idée qu'il en est de même pour l'électricité, même si la description phénoménologique des observations expérimentales ne nécessite aucune interprétation en termes de théorie physique sous-jacente à l'électrification.

Le premier à envisager que «la matière électrique est composée de particules extrêmement subtiles, puisqu'elles peuvent traverser la matière commune, même les métaux les plus denses» [7a] est Franklin qui introduit, vers 1750, les termes positif et négatif pour distinguer les deux sortes d'électricité observées par Du Fay en 1733 et appelées par lui «vitrée» et «résineuse», en se rapportant à la manière de les obtenir. D'autres physiciens, allant plus loin que la théorie du «fluide électrique» de Franklin, mais négligeant cependant son aspect corpusculaire, développent la théorie des deux fluides comme Symmer qui, en 1759, suppose que «la matière à l'état neutre ne possède aucune propriété électrique parce qu'elle contient comme éléments constituants des quantités égales de deux fluides impondérables appelés respectivement électricité positive et électricité négative» [8]. Cette théorie des deux fluides se prête admirablement à la description des phénomènes électriques ainsi qu'aux calculs mathématiques permettant ainsi de répondre au comment sans s'interroger sur le pourquoi, ce qui correspondra un siècle plus tard aux fondements du positivisme de Comte.

La structure atomique de l'électricité aurait pu être renforcée par Faraday, dont les lois de l'électrolyse suggèrent vers 1833, l'existence d'une structure discontinue de l'électricité. Un «quelque chose» appelé charge électrique exercerait une action à distance sur d'autres corps chargés. Cette idée, à la manière de la gravitation, répugne à Faraday. Et comme cette action à distance, au contraire de la gravitation, est dépendante des corps intermédiaires, Faraday se représente la transmission de la force électrique exactement de la manière dont une déformation élastique produite à l'une des extrémités d'une baguette est transmise par cette baguette. Faraday suppose que c'est l'éther qui est le milieu permettant la propagation des forces électriques. Cette hypothèse, traduite en langage mathématique par Maxwell, est démontrée expérimentalement par Hertz. Pourtant Faraday qui a créé les mots «cathode», «anode», «ion» affirme que «les atomes de matière sont en quelque sorte dotés de puissance électrique¹ ou sont associés à ces puissances auxquelles ils doivent leurs qualités les plus marquantes, notamment leurs affinités mutuelles [...] Les masses équivalentes² des corps sont simplement des quantités de ceux-ci qui contiennent une même quantité d'électricité ... Ou, si nous adoptons la théorie ou phraséologie atomique, les atomes des corps qui sont équivalents ont entre eux des quantités égales d'électricité qui leur sont naturellement associées». [9].

Vers 1880, les physiciens sont amenés soit, pour interpréter la conduction des électrolytes, à considérer que l'électricité, aussi bien positive que négative, est divisée en particules élémentaires définies qui se comportent comme des atomes d'électricité, soit, pour interpréter la conductibilité métallique, à considérer des ondes électromagnétiques se propageant dans la matière en introduisant des paramètres caractéristiques des

1 de charges électriques.

2 les équivalents chimiques.

milieux matériels tels que permittivité et conductibilité électrique, ou perméabilité magnétique.

En 1891, Johnstone Stoney, prolongeant ses travaux sur la théorie atomique de l'électricité, présentés en 1874 au congrès de la British Association of Advancement of Science (BAAS) et publiés en 1881, donne **le nom d'électron à l'unité naturelle de charge électrique**, celle que porte un ion monovalent dans l'électrolyse, sans qu'il soit aucunement question de la masse ou inertie qui pourrait y être associée. Il en propose d'ailleurs une valeur (10^{-20}C) pas très éloignée de celle admise aujourd'hui.

2. À LA RECHERCHE DES CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉLECTRON

Depuis 1872, Crookes produit dans des tubes contenant des gaz sous pression réduite des lueurs vertes cathodiques (découvertes en 1859 par Plücker). Il pense que ces lueurs, dont il observe en 1878 qu'elles provoquent des courants très intenses entre anode et cathode, sont dues au déplacement de particules sans doute électrisées.

Mais ces lueurs sont-elles des particules ou des rayons ? En 1876 Goldstein tranche en les appelant «rayons cathodiques», ce qui est en somme un coup de force langagier et intellectuel, sans fondement décisif estime Crookes. Hertz et ensuite son élève Lenard pour lesquels, «parmi les phénomènes connus, c'est la lumière qui en est le plus proche» [7a] prennent le parti de Goldstein contre Crookes puis contre J.-J. Thomson qui leur attribuent une nature corpusculaire. La bataille entre ces deux écoles est d'importance ; en effet l'hypothèse que les lueurs cathodiques sont de nature ondulatoire implique qu'elles ne doivent pas avoir de masse.

En 1879, Crookes conforte, par une série d'expériences, l'idée que les «rayons cathodiques» sont de nature corpusculaire alors que Hertz échoue à montrer qu'il s'agit de radiations. En avril 1881, Thomson jette les bases de la dynamique des particules électriques, en publiant un travail théorique sur la façon dont se comporte une sphère chargée en mouvement, et en calculant l'inertie associée. Dans son ouvrage *Sur les électrons*, Lodge donne son opinion sur ce travail. Il estime que c'est «un des plus remarquables mémoires de tous les temps», qui permet de déduire «de la théorie acceptée et admise de l'électricité» des caractéristiques très importantes (charge, énergie, inertie, rayonnement, potentiel) d'une sphère chargée, «que l'on ait ou non trouvé des électrons et qu'ils existent ou non» [10].

Mais Lenard parvient en 1893 à faire traverser aux rayons cathodiques une mince couche d'aluminium fermant un tube de Crookes, tandis que Thomson en 1894 mesure leur vitesse. Il revient à Perrin, en 1895, de trancher cette controverse sans contestation possible [11]. A l'intérieur d'une ampoule de Crookes, il introduit un cylindre de Faraday qui se charge (figure 1), mettant en évidence que ces rayons sont formés de particules

chargées négativement, et apportant ainsi une première preuve de l'existence des électrons. Reprenant cette expérience, Lenard convient de leur nature corpusculaire et obtiendra en 1905 le prix Nobel pour son travail sur les rayons cathodiques, même s'il a hautement contribué à la résistance ondulatoire dans la constitution épistémologique du concept.

En 1890, Schuster montre comment le rapport de la charge à la masse des particules hypothétiques peut être déterminé ; mais c'est Thomson en 1897 qui détermine expérimentalement ce rapport en combinant la déviation magnétique et la déviation électrique d'un même faisceau de rayons cathodiques .

Thomson estime avoir découvert les particules constitutives des atomes et il s'opposera pendant près de 20 ans à ce qu'on appelle ces particules des électrons. Selon B. Lelong [12], d'autres interprétations possibles de la composition corpusculaire des rayons cathodiques sont proposées, notamment celle de Villard qui les considère comme des particules d'hydrogène électrisées. Lelong montre que Villard admet, en 1908, son erreur d'interprétation. Mais il est amusant de noter que certains auteurs [13], faisant explicitement référence à Villard, soutiennent encore trente ans après les idées de ce dernier.

Dès 1896, Braun invente l'oscilloscope cathodique pour l'étude des phénomènes rapides alors qu'en 1897 Lord Kelvin se demande encore si l'électricité ne pourrait pas être «un fluide homogène continu» même si «les lois de Faraday sur l'électrolyse semblent imposer une structure atomique à l'électricité» [14].

Par ailleurs, alors que Weber construit vers 1870 une théorie de l'électromagnétisme basée à peu de choses près sur les idées de Franklin, c'est Lorentz qui introduit l'atomisme dans la théorie électromagnétique. Les idées de Lorentz prennent leur forme achevée en 1895. La description des phénomènes électromagnétiques dans les milieux matériels s'appuie sur les forces exercées par les champs d'une onde électromagnétique sur les électrons. Cette théorie lui permet d'expliquer l'effet Zeeman (1896) de la décomposition des raies spectrales par le champ magnétique. Mettant en évidence qu'il existe à l'intérieur de l'atome une particule chargée négativement pour laquelle la valeur du rapport $\frac{e}{m}$ est la même que pour les particules cathodiques, il propose la première détermination de m (environ 2000 fois inférieure à la masse de l'atome d'hydrogène). Lorentz et Zeeman reçoivent le prix Nobel en 1902 pour ces travaux.

Par une mesure également de $\frac{e}{m}$, Pierre et Marie Curie mettent en évidence que les rayons β , appelés jusque là rayons de Becquerel (car découverts par lui en 1896) et émis par le radium sont constitués d'électrons doués d'une grande vitesse.

Vers 1900, on peut donc dire que l'électron est accepté comme unité élémentaire d'électricité par une grande partie de la communauté scientifique. Celle-ci s'attache à déterminer ses caractéristiques, notamment la charge et la masse, dès lors que semble émerger la théorie corpusculaire de l'électricité, suite aux travaux décisifs de Townsend (1908). Celui-ci met en évidence quantitativement que la charge moyenne transportée par les ions négatifs dans les gaz ionisés est la même que la charge moyenne transportée par les ions monovalents dans les solutions ; il montre que la charge moyenne transportée par les ions positifs dans les gaz n'est pas sensiblement éloignée de celle transportée par les ions négatifs.

Thomson, au prix de mille difficultés expérimentales, ingénieusement surmontées, mesure un nombre d'électrons à l'aide des brouillards de condensation qu'ils forment dans une chambre de C.-T. Wilson. Son mémoire de 1881 imposait en quelque sorte l'image d'un électron sous la forme d'une bille de très faible diamètre, les premières déductions conduisant à un rayon inférieur à 10^{-13} cm. Le libre parcours moyen, déduit de la théorie cinétique des gaz, est évalué à 10^{-4} cm, c'est-à-dire qu'il peut passer à travers la substance d'un groupe de 10 000 atomes de mercure sans collision. Thomson reçoit le prix Nobel en 1906 pour ses travaux sur les décharges dans les gaz.

Mais si l'électron a un volume, comment dans ce volume se fait la répartition de la charge ? Quels sont les rapports de l'électricité, de la matière et du volume de cette bille ? Quelle est la nature de l'électron ? En un mot comment se représenter cet être nouveau ?

La quasi immatérialité de l'électron conduit des physiciens comme Lodge à considérer qu'une charge électrique n'est rien d'autre qu'un «état de tension de l'éther», et qu'un courant électrique au lieu de représenter le passage de quelque chose le long d'un fil, correspond simplement à une «chute» continue ou à une «rupture» de tension du milieu intérieur au fil. Mais comme le fait remarquer Millikan [15a] : «Il convient parfaitement de dire que le milieu entourant un corps électrisé se trouve dans un état de tension. Mais, dire que la charge que porte un corps électrisé produit un état de tension dans le milieu qui l'entoure, et dire qu'une charge électrique n'est pas autre chose qu'un état de tension du milieu environnant, ce sont là deux affirmations tout à fait différentes...».

En perfectionnant une méthode indiquée en 1903 par H.-A. Wilson, Millikan détermine avec beaucoup de précision vers 1911, la charge électrique élémentaire, autrement dit la charge portée par un électron négatif ou positif. Une longue polémique l'opposera jusqu'en 1923, année où il obtient le prix Nobel, à Ehrenhaft qui soutient la possible existence d'un sous-électron.

Connaissant e et $\frac{e}{m}$, il est aisé de déterminer m . Mais cette masse implique-t-elle que l'électron possède un support matériel ? La masse des corps matériels peut être

déterminée à partir de l'attraction que la Terre exerce sur eux. Mais elle exprime également la résistance que la matière oppose au mouvement, c'est-à-dire ce que l'on peut appeler son coefficient d'inertie. Or comme la matière, l'électricité oppose une force au mouvement. Rowland a établi en 1876, qu'un corps électriquement chargé équivaut, quand il est en mouvement, à un courant électrique dont l'intensité est proportionnelle à la vitesse de déplacement de la charge ; ainsi puisqu'un courant électrique, en vertu de la propriété appelée auto-induction, résiste à toute cause tendant à augmenter ou à diminuer son intensité, il est évident qu'une charge électrique doit posséder comme telle la propriété d'inertie. La masse de l'électron est conçue alors comme l'inertie propre au courant électrique qu'il engendre en se déplaçant et Thomson parle de «masse électromagnétique» de l'électron.

De la notion de «moment électromagnétique», directement relié au vecteur que Poynting a introduit en 1884 pour représenter la propagation de l'énergie électromagnétique, Abraham peut déduire la valeur de la masse électromagnétique de l'électron et montrer qu'elle croît avec la vitesse. Ces travaux sont contemporains de ceux qui ont conduit à la théorie de la relativité. Lorentz vient alors de proposer l'hypothèse, également formulée par FitzGerald, de la contraction des dimensions d'un corps solide en mouvement. Lorentz l'applique à la dynamique de l'électron et en déduit une formule, bien connue en Relativité restreinte, de la variation de la masse m de l'électron en fonction de la vitesse v , différente de celle d'Abraham. Si les premières mesures semblent donner raison à Abraham, Lorentz note, en 1915, que toutes les expériences effectuées depuis 1913 confirment sa propre formule et qu'ainsi «selon toute probabilité, disparaissait la seule objection contre l'hypothèse de l'électron déformable et le principe de relativité [7b]. Que l'électron possède ou non un support matériel, la formule de Lorentz ne fait que traduire la variation de son inertie avec la vitesse.

Vers 1915, le corpuscule électron est parfaitement défini par une représentation à caractère mécaniste. Des considérations touchant la stabilité de l'électron déformable sous l'action des forces électromagnétiques permettent même de préciser l'image que l'on s'en fait : ainsi Poincaré, en 1906, montre que l'électron serait en équilibre s'il était constitué d'une membrane très mince, parfaitement flexible et extensible, soumise à une pression s'exerçant vers l'intérieur.

La charge de l'électron intervient dans la théorie du rayonnement que Planck propose en 1900. Malgré l'imprécision des mesures de rayonnement à cette époque, il en déduit une valeur de la charge de l'électron voisine de celle admise aujourd'hui. Son hypothèse d'une quantification énergétique nécessaire à l'explication du rayonnement d'un corps noir n'a pas connu de retentissement particulier lorsque en 1905, Einstein formule l'hypothèse d'une structure corpusculaire de la lumière. Cette hypothèse ne repose sur aucune base et ne trouve sa vérification expérimentale qu'en 1914, au travers des expériences de Millikan sur l'effet photoélectrique. Si elle révolutionne la nature de

la lumière et de l'éther, elle ne contribue pas à changer profondément la situation de l'électron qui, comme nous venons de le voir, assoit progressivement son statut de particule chargée dont on détermine avec de plus en plus de précision la charge et la masse.

L'ionisation produite par les rayons X dans les gaz, même monoatomiques, met en évidence d'une part la structure complexe de l'atome (qui n'apparaît plus comme insécable) et d'autre part les charges électriques qui entrent dans sa constitution. En 1913, Bohr va provoquer, avec trois hypothèses extraordinaires, un séisme conceptuel sans précédent, à la fois sur la structure de l'atome, sur l'interaction entre la lumière et la matière et sur le problème fondamental à la fois physique et philosophique, de la continuité. Ses hypothèses, enrichies par Sommerfeld en 1916, permettent une explication des spectres lumineux de Balmer avec une précision étonnante. Elles permettent de prévoir dans le domaine de l'émission et de l'absorption une foule de résultats. Mais la théorie de Bohr reste «une théorie de la structure des atomes et non une théorie de la radiation» comme l'indique Millikan [15b], et nous ajouterons non une théorie de l'électron, même si elle renforce le modèle particulaire.

On peut situer l'apogée de l'électron corpusculaire en 1923. En effet, un jeune physicien américain, Compton, étudie le choc d'un photon et d'un électron libre et fournit du même coup la meilleure preuve que l'on puisse donner en faveur de l'hypothèse des quanta de lumière d'Einstein. Les corpuscules de lumière, sortis enfin du domaine théorique se comportent véritablement comme de simples billes. Et par contrecoup, si l'on ose dire, il en est de même des électrons.

Bien que de nature essentiellement physique, les nouvelles conceptions sur la structure de l'atome sont rapidement appliquées en chimie, particulièrement au problème de la liaison chimique. Lewis développe vers 1920 la théorie des doublets d'électrons pour expliquer la combinaison des atomes non-métalliques. Avec Langmuir, il utilise des modèles cubiques statiques d'atome. La liaison par doublets d'électrons dans les composés covalents prend une signification plus précise lorsqu'en 1925 Uhlenbeck et Goudsmit nantissent l'électron d'un moment de rotation, appelé spin. Selon les principes de la mécanique quantique, ce moment ne peut adopter que deux orientations par rapport à la direction d'observation : vers le haut ou vers le bas, à la manière d'une toupie qui ne peut prendre que deux sens de rotation.

De plus le principe d'exclusion de Pauli, formulé peu de temps auparavant (1925) établit que deux électrons ne coexistent jamais dans le même état quantique ; joint au spin, ce principe permet de rendre limpide la structure du tableau de Mendeleïev. Le principe d'exclusion et le spin, que Pauli considère comme très étroitement liés, n'appartiennent pas à la physique classique. Par conséquent, il est inutile de les expliquer par un concept emprunté à la mécanique. La signification profonde du principe d'exclusion de Pauli se trouve dans le langage et les outils de la physique quantique elle-même.

3. LA COMPLEXIFICATION DU CONCEPT

Le 25 novembre 1924, Louis de Broglie soutient devant un jury, un peu dubitatif et présidé par Perrin, une thèse intitulée : «Recherche sur la théorie des quanta», dans laquelle il admet que toute particule matérielle en mouvement, corpuscule de lumière [16] mais aussi électron, est toujours associée à une série d'ondes dites ondes de phase ou quelquefois ondes pilotes. Dans cette conception, l'électron matériel ne serait en somme qu'une apparence. Son énergie serait de nature ondulatoire et c'est seulement la localisation de cette énergie dans un espace très petit qui l'aurait fait considérer comme une particule. Des expériences pour le prouver ? Nullement ! Une intuition conceptuelle que de Broglie analysera avec quelques expressions simples en apparence du type «on peut penser...» ou «on devine...». Ainsi, cette localisation, cette mise en corpuscule de l'électricité qui avait eu tant de mal à naître (plus de 50 ans d'efforts) ne serait finalement qu'une des deux formes de l'électron ? Deux ans plus tard, Davisson et Germer mettent en évidence la diffraction des électrons par un cristal. La double nature corpusculaire et ondulatoire de l'électron devient un concept physique passé au tamis de l'expérience. Ceci conduira Knoll et Ruska à réaliser en 1932 le premier microscope électronique et ira beaucoup plus tard (en 1997), jusqu'à la réalisation au M.I.T. d'un laser à atomes par Ketterle [17] et son équipe.

En 1925, Heisenberg utilise une mécanique matricielle de son invention (obscur à plaisir confiera Einstein) pour décrire les états de l'électron. La non commutation de ces matrices, ces nouveaux opérateurs représentatifs des grandeurs physiques, introduit la relation d'incertitude. Le principe d'incertitude énonce qu'il y a une limite intrinsèque à la précision simultanée de deux variables dites variables conjuguées, telles que la position et la vitesse d'une particule en mouvement. Plus la mesure de la position est précise moins celle de la vitesse l'est et *vice versa*. Cette imprécision n'est pas le fait de l'expérimentateur, mais une conséquence des équations de la mécanique quantique. Le principe d'incertitude d'Heisenberg est une limitation fondamentale et incontournable à la connaissance du monde. Bien plus, il n'y a plus de causalité absolue, et la logique classique ne s'applique pas [18].

Ainsi est né ce que l'on a appelé l'interprétation de Copenhague de la mécanique quantique (ou mécanique des matrices). Selon Heisenberg, Dirac, Jordan, Born qui collaborent avec Bohr à Copenhague, une théorie physique doit introduire uniquement des grandeurs dont la valeur peut être directement observée et éviter toute représentation dont certains éléments seraient inaccessibles à l'expérience. On est donc en présence d'un pur formalisme rejetant toute image du monde microphysique, mais susceptible de rendre compte de tous les phénomènes observables à l'échelle atomique, tels l'existence de sauts quantiques et de discontinuités à l'intérieur des atomes, à l'aide de simple calculs algébriques.

Comme le précise de Broglie [19] : « Dans cette interprétation, il n'y a plus en physique quantique que des lois de probabilité, de probabilité "pure" sans aucun mécanisme causal sous-jacent et ignoré. L'onde de la mécanique ondulatoire n'est plus aucunement une réalité : elle n'est plus qu'une solution d'une équation aux dérivées partielles du type classique de l'équation des ondes, solution qui se trouve être l'instrument mathématique approprié pour la représentation de la probabilité du résultat de certaines mesures. Le corpuscule lui aussi prend un aspect fantomatique : il n'a plus ni localisation permanente dans l'espace, ni valeur à chaque instant de son énergie et de sa quantité de mouvement, il est en général présent à l'état potentiel dans toute une région étendue de l'espace et réparti statistiquement entre plusieurs états de son mouvement. L'expérience peut bien permettre de localiser le corpuscule ou d'attribuer une valeur à sa quantité de mouvement, mais toujours furtivement et jamais au même instant : c'est ce qu'expriment en termes mathématiques les relations d'incertitude d'Heisenberg. Pour traduire les apparences corpusculaires et ondulatoires si nettement caractérisées dans le cas de la lumière par l'effet photoélectrique d'une part, par les interférences d'autre part, dans le cas des électrons par les trajectoires visibles dans les chambres de Wilson d'une part, la diffraction par les cristaux d'autre part, Bohr a introduit la notion de "complémentarité" : le corpuscule et l'onde seraient des aspects complémentaires de la réalité, d'une réalité qui échapperait à toute description plus intelligible ».

En 1926, Schrödinger, qui à la demande de Langevin et par l'intermédiaire de Debye a eu à examiner le projet de thèse de de Broglie, établit sur des bases mathématiques rigoureuses le formalisme de la mécanique ondulatoire et montre ensuite que le formalisme de la mécanique quantique peut être considéré comme une simple transposition algébrique de celui auquel aboutit la mécanique ondulatoire. L'équation de Schrödinger est une équation déterministe à laquelle obéit la fonction d'onde décrivant l'état d'un système.

En résumé, le formalisme mis en évidence par Schrödinger montre que l'onde associée doit être partout régulière (non singulière) pour satisfaire l'équation d'onde. Dès lors, on est amené à penser soit que la « réalité physique » est uniquement de nature ondulatoire (le corpuscule constituant un paquet d'ondes, c'est l'interprétation de Schrödinger), soit que le caractère de l'onde demeure purement statistique, susceptible de décrire des probabilités de localisation et d'état de mouvement dans l'espace et le temps (thèse de la majorité des physiciens, suivant en cela l'interprétation de Copenhague).

Citons encore de Broglie [19] : « Ces deux nouvelles formes de la microphysique restaient animées de tendances opposées, analogues à celles qui avaient animé naguère les atomistes d'une part et les énergétistes d'autre part : la mécanique ondulatoire cherchait à obtenir une représentation des phénomènes microphysiques dans le cadre de l'espace et du temps fournissant une image claire et intelligible de l'association des ondes et des corpuscules tandis que la mécanique quantique, considérant ces préoccupations

comme vaines, voulait se contenter de construire un formalisme capable de fournir avec exactitude la prévision des phénomènes expérimentalement constatables». Pour lui, cependant, la nature présente à la fois ce double aspect ondulatoire et corpusculaire, l'onde réelle guide le corpuscule dans son voyage (onde pilote), ou (théorie de la double solution) s'incarne dans une onde réelle singulière doublée par une représentation statistique régulière solution de l'équation de Schrödinger.

Dirac contribue à partir de 1927 à édifier une mécanique ondulatoire relativiste qui permet d'interpréter les phénomènes dus au moment magnétique propre de l'électron. Mais son équation comportant des solutions à énergie négative, il est rapidement convaincu qu'elles représentent des électrons de charge positive. La nouvelle particule, le positron, est découverte en 1932 par Anderson dans des clichés de rayons cosmiques obtenus dans une chambre de Wilson.

L'Épilogue de l'ouvrage : *L'Électron* de J. GRANIER [20] paru dans la collection «Que sais-je» nous semble résumer un demi siècle de recherches :

«A la fin de ses Métamorphoses, Ovide pousse, si nos souvenirs sont exacts, un cri de triomphe : “Jamque opus exegi...”³ et il prédit à son livre l'immortalité. Nous ne pouvons guère avoir les mêmes illusions, car notre électron, cette petite boule électrisée si personnelle, si vivante, si obéissante qui retrouvait immédiatement son chemin dans les montages les plus compliqués et obéissait scrupuleusement dans les triodes ou les oscillographes aux moindres variations de potentiel, cet électron que les physiciens de ces dernières années imaginaient circulant bien sagement dans des rainures autour d'un noyau atomique et qui comme dans les appareils à sous que l'on rencontre dans les foires envoyait un signal lumineux chaque fois que, par une trappe, il passait de l'une à l'autre, cet électron, aux dernières nouvelles, il paraît qu'il n'existe plus. Ce sont les mathématiciens qui l'ont tué. Oh ! pas du premier coup. Ils ont commencé par supprimer sa masse qui est devenue l'inertie électromagnétique d'un sillage, puis comme on n'avait pas besoin qu'il fût rond ni électrisé, on en a fait une discontinuité de l'éther. Mais on a tué aussi l'éther ; alors l'électron est devenu un trou dans le vide. C'était trop matériel encore, trop précis : un trou ce n'est pas grand chose, mais on peut quand même savoir où ça se trouve. Alors on s'est acharné sur la dépouille de ce pauvre électron et, en invoquant le «principe d'incertitude», on a rendu ses contours aussi flous que ceux d'un brouillard ; ce n'est plus semble-t-il à l'heure actuelle qu'une zone de probabilité d'une certaine fonction Psi. Mais il y a malgré tout quelque chose qui existe encore ; ce sont nos schémas, nos calculs. Qu'importe que dans la prochaine édition, au lieu de figurer dans les actualités scientifiques notre ouvrage soit obligé de paraître dans la collection des Romans historiques ; avec ou sans électrons, nos appareils marcheront quand même, et c'est là l'essentiel».

³ Enfin s'achève mon œuvre...

Mais est-ce la fin de l'histoire ? Pas tout à fait, puisqu'en 1952 de Broglie [19] reprend ses idées de 1926-27 qui tendent à représenter le corpuscule d'une façon concrète comme un accident localisé incorporé dans la structure d'une onde étendue à caractère physique et à obtenir ainsi selon lui «une représentation claire et intelligible de l'association des ondes et des corpuscules assez analogue aux images qu'employait l'ancienne physique».

Ces recherches seront approfondies par Bohm [21]. Dans le schéma de Bohm, les fonctions d'onde ne sont pas uniquement des objets mathématiques ; elles ont une signification physique. Bohm les traite un peu à la manière des champs de force classiques, tels que les champs gravitationnels et magnétiques. Les fonctions d'onde de la théorie de Bohm agissent sur les particules comme un champ de force classique : elles poussent les particules de l'avant, elles les guident le long de leur propre trajectoire.

Pour de Broglie et Bohm, la mécanique quantique est aux mécanismes réels ce que la thermodynamique était au siècle précédent aux mouvements moléculaires. De Broglie parle de «thermodynamique cachée des particules», et cherche à retrouver les lois de la mécanique quantique en effectuant une moyenne sur des quantités calculées à partir de variables cachées. Ces variables cachées devaient permettre d'éliminer l'aspect indéterministe et probabiliste de la mécanique quantique.

En 1964, prolongeant les études de Bohm et de de Broglie, J. Bell [22] démontre que les prévisions des «théories dites à variables cachées» sont incompatibles avec celles de la physique quantique. Ceci est vérifié expérimentalement en 1982 par Aspect [22].

4. ET MAINTENANT...

Si l'on consulte une des dernières éditions de l'*Encyclopedia Universalis*, à l'article Électron [23], on peut lire l'introduction-résumé suivant :

«L'électron est une particule élémentaire stable. Il possède une charge électrique négative, une très petite masse (près de 2000 fois plus petite que celle de l'atome le plus léger : l'hydrogène), et un moment angulaire propre appelé spin, auquel est lié un moment magnétique intrinsèque. L'électron est soumis à la gravitation, ainsi qu'à la force électrofaible. En fait, c'est la partie proprement électromagnétique de cette dernière qui fait que cette particule est indispensable en chimie, en électricité, en électronique et dans la grande majorité des processus qui se trouvent à la base des techniques industrielles. Par contre, il n'est pas sensible à l'interaction nucléaire forte, ou chromodynamique, qui est notamment responsable de la cohésion des noyaux des atomes. L'électron ne peut être correctement décrit que dans le cadre quantique, où, malgré ses propriétés variées, on le représente par une entité ponctuelle, sans dimension. C'est en ce sens qu'il reste, depuis sa découverte il y a près d'un siècle, une particule élémentaire, stable, constituant fondamental de la matière qui ne peut être brisé, et dont aucune

propriété ne nécessite l'hypothèse d'une sous-structure. L'antiparticule de l'électron est le positron, ou électron positif, qui lui est en tout point semblable, excepté pour le signe de la charge électrique. De même, l'interaction électrofaible agit différemment sur l'électron selon que son moment angulaire propre est aligné dans le sens de l'impulsion ou dans le sens opposé : on parle alors respectivement d'électron droit ou gauche. [...]».

On va même plus loin, car si l'électron est considéré comme une particule élémentaire de la famille de celles qui peuvent se déplacer librement (les leptons qui se comportent comme des fermions), on lui associe dans un certain nombre de décompositions des neutrino-électrons, ou bien des muons et tauons, et ces derniers apparaissent comme des électrons lourds auxquels sont associés leurs propres neutrinos.

Quant aux supraconducteurs, leurs électrons, à la différence d'un métal, sont appairés en «paires de Cooper», qui orientent leur spin dans des directions opposées de telle sorte que le spin total de chaque paire est nul, et ces paires se comportent alors comme des bosons.

Enfin, récemment les expériences d'effet Hall quantique fractionnaire dans des systèmes bidimensionnels réalisés par L. SAMINADAYAR *et al.* ont mis en évidence des quasi particules transportant une charge égale à $1/3$ de celle de l'électron [24]. En soi, ce résultat peut surprendre puisque jusqu'à présent seuls les quarks que l'on ne peut observer isolés possèdent une charge fractionnaire. Cela ne signifie pas pour autant que l'électron est sécable en éléments plus petits, ou que la charge du système considéré est constituée par l'addition d'excitations élémentaires de charge $e/3$. Il s'agit simplement que dans des conditions particulières, notamment de champ magnétique, ils se rassemblent en d'étranges objets... prévus en 1984 par R. LAUGHLIN, prix Nobel de Physique 1998 pour ce travail.

5. CONCLUSION

Il y a un siècle, une vision mécaniste de la physique amène les scientifiques qui croient à l'atomisme (contre les positivistes privilégiant le fait et la méthode expérimentale par rapport aux hypothèses), à caractériser l'électron par ses attributs : rayon d'une sphère équivalente, masse, charge. Aujourd'hui, si les valeurs de ces deux dernières caractéristiques sont connues avec une grande précision, aucun livre de physique ne se hasarde à fournir une description quelconque de cette particule élémentaire. Les étranges propriétés du monde quantique - indétermination objective, hasard objectif, probabilité objective et non-localité - semblent désormais faire partie de la physique de l'électron puisque la mécanique quantique permet d'expliquer les résultats observés sans avoir besoin de décrire une réalité intime. N'est-ce pas une forme de néopositivisme ? puisque, pour Auguste Comte, une théorie physique doit introduire uniquement des grandeurs dont la valeur peut être directement observée et éviter toute représentation dont

certaines éléments seraient inaccessibles à l'expérience. «La science, écrivait-il, a fait trop belle la part de l'hypothèse, elle a perdu trop de temps à des discussions stériles sur l'essence des choses. Prenons pour seuls guides l'expérience et la raison» [25].

NOTES

- [1] Article de H. GEE dans Le Monde du 28 mars 1997, page 24 intitulé : «*Comment la découverte de l'électron a bouleversé la perception du monde*». Le britannique J.-J. Thompson s'est appuyé sur plusieurs siècles d'observations pour mettre en évidence cette particule élémentaire de la matière, responsable de l'électricité, ouvrant ainsi la voie à la physique atomique.
- [2] N. HULIN «*Histoire des sciences et Enseignement scientifique*». BUP n° 786, juillet-août-septembre 1996, pages 1201-1243.
M. BERNARD : «*L'histoire dans l'enseignement des sciences physiques*». BUP n° 796, juillet-août-septembre 1997, pages 1433-1436.
M. SCHEIDECKER-CHEVALLIER et G. LAPORTE : *A propos du débat sur «l'histoire dans l'enseignement des sciences physiques»*. BUP n° 803, avril 1998, pages 637-639.
- [3] J.-M. DUSSEAU et P. FRÉCHENGUES : «*Introduction de l'électron dans l'enseignement secondaire français vue à travers quelques manuels*». DIDASKALIA (à paraître, 1998).
- [4] Pour plus de détails se reporter au chapitre 17 : «*L'analyse face aux atomes*» de l'ouvrage «*Histoire de la Chimie*», cité dans la bibliographie.
Le problème posé est, par exemple, si un volume de gaz chlore se combine à un volume de gaz hydrogène pour produire deux volumes de chlorure d'hydrogène, selon DALTON, un «atome de chlore» et un «atome d'hydrogène» donneront deux «atomes d'acide chlorhydrique».
- [5] J.-B. DUMAS : «*Leçons de philosophie chimique*». Septième leçon, 28 mai 1936. Paris, Gauthier-Villars, 1937, page 178.
- [6] W. OSTWALD : «*L'évolution de l'électrochimie*», Paris, F. Alcan, 1912, page 243.
- [7] Cité dans «*La science contemporaine. Le XX^e siècle, année 1900-1960*», Taton éditeur, Paris - Quadrige, P.U.F., 1995, a) page 255 - b) page 258.
- [8] Cité par R.-A. MILLIKAN : «*L'électron*» - Paris, Alcan, 1926, page 15.
- [9] Cité dans «*La science contemporaine. Le XIX^e siècle*», Taton éditeur, Paris, P.U.F., première édition, 1961, page 221.
- [10] O. LODGE : «*Sur les électrons*» - Paris, Gauthier-Villars, 1906, pages 17 et 18.

- [11] J. PERRIN : «*Nouvelles propriétés des rayons cathodiques*» - Compte Rendu de l'Académie des Sciences, séance du 30 décembre 1895, volume 121, pages 1130-1134.
- [12] B. LELONG : «*Paul Villard, J.-J. Thomson et la composition des rayons cathodiques*» - Revue d'histoire et des sciences, tome 50, n°1/2, pages 89-130. Voir également «*Personne n'a découvert l'électron*». L'émergence de la première particule fut un long travail collectif et multiforme - La Recherche n° 303, novembre 1997, pages 80-84.
- [13] I. ANDREÏ : «*L'erreur du concept d'électron. Identité de l'électron avec l'atome d'hydrogène*». Preuves expérimentales - Bucarest : I.-E. TORONTIOU, 1932.
Sur 238 pages, cet auteur interprète un grand nombre d'expériences, y compris les plus récentes, à son époque, comme celle de Davidson et Germer, en considérant les électrons comme des atomes d'hydrogène.
- [14] Lord KELVIN : «*Électricité de contact et l'électrolyse*» - Nature, LVI, 1987, page 84.
- [15] R.-A. MILLIKAN : «*L'électron*» - Paris, Alcan, 1926, a) page 21, b) page 276.
- [16] C'est LEWIS qui en 1926 suggère le terme de photon. Voir «*Les conseils Solvay*», page 168.
- [17] M.-O. MEWES, M.-R. ANDREWS, D.-M. KURN, D.-S. DURFEE, C.-G. TOWNSEND and W. KETTERLE : «*Output coupler for Bose-Einstein condensed atoms*» - Physical Review Letter, Volume 78, n° 4, 1997, Pages 582-585.
- [18] W. HEISENBERG : «*Physique et philosophie*» - Paris, A. Michel, 1961.
- [19] L. de BROGLIE : «*La physique atomique et quantique contemporaine*» - In «*La science contemporaine. Le XX^e siècle, années 1900-1960*», Taton éditeur - Paris, P.U.F., 1983, pages 129-147.
- [20] J. GRANIER : «*L'Électron*» - Collection «Que sais-je ?» n° 175, Paris P.U.F., 6^e édition (1962), pages 126-127.
- [21] D. ALBERT : «*La théorie quantique de David Bohm*». In Dossier hors série Pour la Science : La physique quantique - juin 1994, pages 32-39.
- [22] A. SHIMONY : «*Réalité du monde quantique*» - In Dossier hors série Pour la Science : La physique quantique - juin 1994, pages 42-51. Voir également «*Le monde quantique*» - Paris, Le Seuil, collection points sciences, 1994, pages 121-140.
- [23] J.-E AUGUSTIN : «*Électron*». In Encyclopédia Universalis - (édition de 1989), vol. 8, page 116.
- [24] L. SAMINADAYAR, D.-C. GLATTLI, Y. YIN et B. ETIENNE : «*Observation of the $e/3$ fractionally charged Laughlin quasiparticles*». Physical Review Letters - volume 79, n° 13, 1997, pages 2526-2529.

[25] Cité par J. LAMIRAND et M. JOYAL : «*Sciences Physiques, classe de philosophie*» - Paris, Masson, 1954, page 332.

BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE.

B. BENSUADE-VINCENT, I. STENGERS : «*Histoire de la chimie*» - Paris, La découverte, 1993.

B. PULLMAN : «*L'atome dans l'histoire de la pensée humaine*» - Paris, Fayard, 1995.

R. TATON (1983) : «*La science contemporaine. Le XX^e siècle, années 1900-1960*» - Paris, P.U.F.

«*Histoire de la physique*» - Paris, Lavoisier, Tec et Doc. 1987,
tome 1 : «*La formation de la physique classique*» par J. ROSMORDUC *et al.*
tome 2 : «*La physique au XX^e siècle*» par J.-P. MATHIEU *et al.*

«*Les conseils Solvay et les débuts de la physique moderne*» (P. MARAGE et G. WALLENBORN, Eds). Université libre de Bruxelles, 1995.

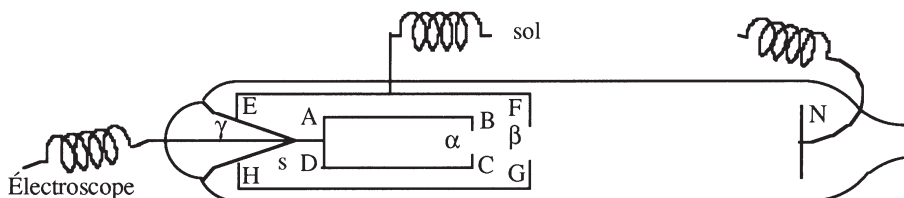


Figure 1 : «ABCD est un cylindre métallique fermé de toutes parts, sauf une petite ouverture α au centre de la face BC. C'est lui qui jouera le rôle de cylindre de Faraday. Un fil métallique, soudé en s à la paroi du tube, fait communiquer ce cylindre avec un électroscope. EFGH est un deuxième cylindre, *en communication permanente avec le sol*, et percé seulement de deux petites ouvertures en β et γ . Il protège le cylindre de Faraday contre toute influence extérieure. Enfin, à 0,10 m environ en avant de FG, se trouve une électrode N...» [11].