

Contexte Historique: Les Atomes

Le concept d'atome est fondamental dans notre compréhension scientifique actuelle du monde. L'éminent physicien Richard P. Feynman se demande dans l'introduction à la première de ses fameuses Lectures on Physics « si, dans un cataclysme, toute notre connaissance scientifique devait être détruite et qu'une seule phrase passe aux générations futures, quelle affirmation contiendrait le maximum d'informations dans le minimum de mots ? ». « Je crois » continue-t-il « que c'est l'hypothèse atomique (ou le fait atomique, ou tout autre nom que vous voudrez lui donner) que toutes les choses sont faites d'atomes - petites particules qui se déplacent en mouvement perpétuel, s'attirant mutuellement à petite distance les unes les autres et se repoussant lorsque l'on veut les faire se pénétrer. » (Feynman et al. 1963, I-3)¹.

Cet énoncé est tout à fait pertinent dans ce contexte historique consacré aux atomes, en ce que Feynman manifeste combien la conception de structure atomique de la matière est essentielle pour la science contemporaine. Et il soulève implicitement une autre question, liée à l'analyse de la genèse de ce concept. En parlant de « l'hypothèse atomique (ou le fait atomique, ou tout autre nom que vous voudrez lui donner) », Feynman identifie et ignore à la fois un détail pourtant crucial : le mode d'existence de l'atome tient à la fois de l'hypothèse et du fait, et dans ce cas, quelle description du concept correspond à quel mode d'existence ? Feynman néglige le problème en laissant au lecteur la décision de comment le nommer – une forme apparemment très frustrante de relativisme, qui peut être expliquée par une publication qui remonte aux débuts des années 60. A cette époque en effet, une attitude différente d'un point de vue épistémologique ou d'une perspective de la nature de la science est peu plausible. Un tel énoncé, gênant aujourd'hui, illustre en réalité parfaitement le degré auquel la connaissance sur la nature de la science s'est développée dans les dernières décennies.

Pour enseigner le concept d'atomisme, on doit de surcroît admettre un autre aspect de son développement historique - à savoir que le concept d'élément chimique est un prérequis pour la formulation du modèle atomique. Ceci peut être constaté dans les analyses historiques, aussi bien celles qui portent sur la Grèce antique que celles consacrées à la période moderne. On retrouve cet aspect dans les conceptions pédagogiques. Le développement historique du concept d'élément chimique dépasse le cadre de ce document.

¹ Citation originale en anglais : “[i]f, in some cataclysm, all of scientific knowledge were to be destroyed, and only one sentence passed on to the next generations of creatures, what statement would contain the most information in the fewest words? I believe it is *the atomic hypothesis* (or the atomic fact, or whatever you wish to call it) that *all things are made of atoms—little particles that move around in perpetual motion, attracting each other when they are little distance apart, but repelling upon being squeezed into one another*”

Discussions antiques sur la structure de la matière

La question de la structure du monde matériel était déjà discutée en Grèce antique, dont les connaissances ont été, en grande partie, transmises en Europe aux débuts des Temps Modernes.² Dans ce cadre, l'idée d'un élément fondamental qui constitue toutes les autres substances est tout à fait pertinente ; mais cette idée n'est pas du tout synonyme d'un concept atomique simple, puisque l'élément fondamental pouvait exister sans structure corpusculaire aucune. Des philosophes tels que Thalès de Milet, Anaximène, Héraclite et Empédocle ont défendu leurs conceptions respectives. Vers 450 avant JC, deux philosophes, Démocrite et Leucippe, présentèrent des idées adaptées à l'introduction du concept de l'atome. Tous deux postulèrent que le monde matériel est composé de particules très très petites qui ne peuvent être divisées en parties plus petites et se distinguent les unes des autres par leur forme et leur taille. Selon Démocrite, ces atomes se meuvent dans un espace vide et rentrent en collision les unes avec les autres. En créant des combinaisons spécifiques d'atomes, d'autres substances sont formées. Ces combinaisons ne sont pas permanentes, et les atomes peuvent être séparés ultérieurement. Les conceptions de Leucippe et de Démocrite ne furent toutefois pas acceptées par leurs contemporains parce que deux facteurs allaient à l'encontre d'une large acceptation de cette version classique de l'atomisme.

Le premier facteur était le matérialisme intransigeant de cette philosophie. En expliquant les sensations et même la pensée en termes de mouvement des atomes, les atomistes remettent en cause la compréhension de soi-même que revendique l'homme. Les atomistes ne semblent laisser aucune place aux valeurs spirituelles. Il est impensable que les valeurs

² Il y a des témoignages de modèles de la matière dans les cultures Indienne et Babylonienne; néanmoins, la documentation sur ces concepts originaux est peu abondante et ils n'ont par ailleurs pas joué de rôle dans l'introduction de la théorie atomique dans la science Européenne. Pour cette raison, ils ne figurent pas dans ce contexte historique.

d'amitié, de courage, ou de piété puissent être réduites à la marche des atomes. Par ailleurs, les atomistes ne laissaient aucune place à des considérations de finalité, qu'elle soit naturelle ou divine.

Le deuxième facteur était le caractère ad hoc de l'explication atomiste.³

Il y avait d'autre part une conception concurrente, celle des quatre éléments, qui semblait supérieure en ce qu'elle permettait d'expliquer le comportement de tous les matériaux existants ainsi que leurs propriétés, grâce aux éléments de l'eau, de l'air, du feu et de la terre.⁴

Un acteur central de ce rejet de la théorie atomiste fut Aristote, qui prôna la théorie des quatre éléments, et y ajouta un cinquième, l'éther, qui remplit l'espace entre les objets célestes. Selon Aristote, il ne pouvait exister de vide, à cause de l'*horror vacui*, c'est à dire l'« horreur » de la nature pour le vide. Il croyait que tout dans la nature était porté par une intention, and qu'il n'y a donc aucune action superflue dans la nature. De surcroît, chaque objet possède un lieu naturel, et s'il est déplacé, tend à rejoindre ce lieu. En se basant sur ces principes, Aristote était capable d'expliquer des processus observables. Les atomistes quant à eux n'étaient pas seulement incapables de fournir ce genre d'explications, mais ils postulaient l'existence de particules invisibles, ce qui constituait la critique fondamentale d'Aristote envers la théorie atomiste, qui exigeait de surcroît d'accepter l'idée du vide. Il trouvait aussi l'idée d'objets en mouve-

³ Citation originale en anglais : two factors weighed against any widespread acceptance of the classical version of atomism. The first factor was the uncompromising materialism of this philosophy. By explaining sensation and even thought in terms of the motions of atoms, the atomists challenged man's self-understanding. Atomism seemed to leave no place for spiritual values. Surely the values of friendship, courage, and worship cannot be reduced to the con-course of atoms. Moreover, the atomists left no place in science for considerations of purpose, whether natural or divine. The second factor was the *ad hoc* nature of the atomists' explanations. (Losee 2001, 25)

⁴ Il faut bien comprendre que ces éléments ne sont pas ce que nous appelons terre, eau, air et feu, mais des principes élémentaires porteurs de qualités (voir le contexte historique consacré au développement du Tableau périodique).

ment permanent absurde. Il s'opposa au concept atomiste dans sa totalité, dans la mesure où cela rentrait en contradiction flagrante avec certains de ses principes fondamentaux. Malgré cela, Aristote demeure essentiel au développement moderne de la théorie atomique, parce que les œuvres de Leucippe et de Démocrite ont été perdues et nous sont connues seulement à travers les critiques d'Aristote.

Les œuvres d'Aristote quant à elles ont été conservées et amplifiées par la culture Arabo-musulmane, et par le biais du monde islamique, sont venues s'intégrer à la culture chrétienne de l'Occident médiéval. Durant la période scolastique, l'Aristotélisme ainsi modifié devint dominant, en grande partie parce que c'était considéré comme s'accordant avec la Bible. Avec le temps, les astronomes, et plus tard les philosophes naturels développèrent une conception différente des processus naturels. L'autorité d'Aristote fut de ce fait de plus en plus remise en cause durant les 17^{ème} et 18^{ème} siècles, au point qu'à la fin de cette période, cette autorité fut abolie au profit de l'expérience, pratiquée par les philosophes naturels des Lumières, qui sont capables de découvrir les lois et les structures de la nature.

Dans ces circonstances, certaines expériences et considérations théoriques furent développées qui semblaient rejoindre l'ancienne hypothèse atomiste. D'une importance cruciale fut la démonstration de l'existence du vide.⁵ Un autre argument qui a servi l'atomisme fut la réflexion sur la combustion de l'encens. Lorsqu'un tout petit morceau d'encens est brûlé, son odeur envahit toute la pièce. Puisque la pièce est significativement beaucoup plus grande que le morceau d'encens, l'on calcula que ce morceau devait avoir été divisé en plus de 750,000,000 parties. Ces calculs avaient pour but de démontrer combien minuscules les particules devaient être pour former le bout d'encens (voir Beer & Pricha 1997). La discussion cependant resta au niveau du simple calcul, et ne déboucha pas sur une af-

⁵ Sur les controverses sur l'existence du vide, et les implications philosophiques sous-jacentes, voir Shapin and Schaffer 1989.

firmation de l'existence des atomes ou la nature de leurs propriétés. Une telle compréhension ne fut développée qu'au tout début du 19^{ème} siècle.

Structurer la matière : Dalton

Dans la genèse de la science moderne, le premier savant à plaider pour une conception atomique est John Dalton, un chimiste qui suivait la nouvelle approche quantitative initiée par Lavoisier. Le recours à la balance pour analyser les réactions chimiques constitue l'acquis majeur du nouveau système chimique, car il permit aux chimistes d'aborder les réactions chimiques selon un nouvel angle. A plusieurs reprises en effet, Lavoisier lui-même a établi le contraste entre la chimie classique de son temps, et son approche novatrice ; ainsi que le souligne Nye « Lavoisier écrit dans ses *Opuscules physiques et chimiques* (1774) qu'il 'applique à la chimie non seulement les instruments et les méthodes de la physique expérimentale mais aussi l'esprit de précision et de calcul qui caractérise cette science' » (1993, 35)⁶.

En réalité, ce n'est pas seulement la méthodologie ou les modifications conceptuelles qui distinguèrent la chimie de Lavoisier des conceptions précédentes. Deux aspects principaux et différents de sa compréhension de la chimie étaient la notion de réactions chimiques qui lui permit à utiliser une description quantitative, ainsi que le concept des "substances simples" qui étaient des éléments qui ne pouvaient être décomposés en plus petits éléments. A ce sujet, Lavoisier dit explicitement:

Je vais donc seulement ajouter la précision que si, par le terme éléments, on veut parler de ces atomes simples et indivisibles dont la matière est composée, il est extrêmement probable qu'on ne connaisse rien de ceux-ci; mais si on

⁶ Citation originale en anglais : "Lavoisier wrote in the *Opuscules physiques et chimiques* (1774) that he 'applied to chemistry not only to the apparatus and methods of experimental physics but also the spirit of precision and calculation which characterizes that science'"

utilise le terme éléments, ou principes des corps, pour parler des plus petits éléments que l'on peut analyser, on doit admettre comme éléments toutes les substances en lesquelles on peut décomposer les corps (Lavoisier 1794, xxiii).

Notons au passage que Lavoisier utilisait le terme "atome" alors qu'il n'utilisait pas une théorie atomique. La notion d'élément dans le discours de Lavoisier est un signe de l'émergence de la théorie atomique, mais non sa naissance.

Grâce aux observations quantitatives de la fin du 18^{ème} siècle, qui montrèrent que les composés chimiques étaient le résultat de la réaction en proportions spécifiques des éléments formant ce composé, la loi de composition constante fut formulée. Bien que cette loi semble valable pour les réactions chimiques qui avaient été analysées quantitativement, il y avait un autre aspect frappant que Dalton fut le premier à caractériser. Il se rendit compte qu'il existait des réactions chimiques dans lesquelles des composés différents pouvaient être créés par la réaction de deux éléments (par exemple, en faisant réagir du cuivre avec de l'oxygène, on peut produire deux types de composés, de même avec le carbone, l'oxygène, etc.). Le composé résultant de la réaction dépendait de la quantité de chaque substance ayant réagi. Il y avait également une autre régularité que Dalton remarqua: il y avait un nombre fini de rapports de petits nombres entiers entre la masse d'élément A qui réagissait avec un élément B pour former deux composés différents. De cette découverte, Dalton formula une loi: la loi des proportions multiples. Cette loi énonce que si deux composés peuvent être formés par la réaction de deux éléments, la masse d'élément A réagissant avec une quantité donnée d'élément B pour former un composé AB₁ est proportionnelle à la masse d'élément A réagissant avec la même quantité d'élément B pour former un composé AB₂, et que cette proportion est faite de petits nombres entiers (2/3, 1/4, 3/4, etc.). Cette loi, en

plus de celle de la composition constante, forma le début de l'approche stoechiométrique en chimie.

Les expériences qui permirent à Dalton de découvrir la loi des proportions multiples lui permirent également de tirer d'autres conclusions. Lors d'une conférence à l'Institution Royale de Grande Bretagne⁷, il proposa les idées suivantes, qui sont à la base de l'actuelle théorie atomique de la matière:

Toute matière est composée d'atomes.

Les atomes ne peuvent être ni créés ni détruits.

Tous les atomes d'un même élément sont identiques.

Des éléments différents ont des types d'atomes différents.

Des réactions chimiques se produisent quand les atomes sont réarrangés.

Les composés sont formés d'atomes de leurs éléments constitutifs.⁸

Il est clair que l'atome de Dalton n'est pas le même que celui de Lavoisier. Le concept d'atome de Dalton est caractérisé entre autres par le fait qu'il est dénombrable et possède un certain poids, alors que dans la conception de Lavoisier, les propriétés chimiques sont plus pertinentes et l'atome ne représente pas nécessairement une particule mais bien une entité chimique de base selon les limites de l'analyse possible.

Ces hypothèses permirent à Dalton de trouver une explication aux lois stoechiométriques, observées empiriquement, que lui et d'autres avaient formulées. Selon sa compréhension, la loi de composition constante est une conséquence du fait que tous les atomes d'un même élément sont identiques, et que les réactions chimiques sont un réarrangement des atomes. La loi des proportions multiples peut alors être interprétée

⁷ D'après Clarke (1803), la première présentation eut lieu à la Manchester Philosophical Society.

⁸ <http://www.rsc.org/chemsoc/timeline/pages/1803.html>, dernière visite le 18 Avril 2012

comme le résultat de différents arrangements d'atomes résultant en différents composés. Dans cette interprétation, les connaissances de l'analyse chimique quantitative fondèrent le premier paradigme de la chimie, dans le sens Kuhnien du terme, et élevant la chimie stoechiométrique au rang d'une science.

Pendant, l'acceptation fut loin d'être automatique. Bien que la théorie de Dalton fut rapidement acceptée par plusieurs chimistes, d'autres la rejetèrent. Un problème clé était l'hypothèse que chaque élément était formé d'un atome différent, ce qui permit d'identifier environ trente atomes différents au début du 19^{ème} siècle, ce nombre allant croissant. Donc, plutôt que de simplifier la structure de la matière, la théorie atomique de Dalton semblait rendre la nature plus complexe. Malgré cette critique, les lois stœchiométriques étaient utilisés pragmatiquement par les chimistes, dont certains utilisaient des fractions de nombres entiers pour exprimer les rapports de masses, impliquant qu'il n'existait pas de particule indivisible.

Ceci ne fut pas juste un problème d'acceptation initiale, car des réserves par rapport à cette théorie furent encore exprimées explicitement jusqu'à soixante ans plus tard. En 1869, le Président de la Chemical Society, Alexander William Williamson, dit dans un discours "... que d'un côté, tous les chimistes utilisent la théorie atomique, et que de l'autre, grand nombre d'entre eux la regardent avec méfiance, certains même avec aversion" (cité dans Tilden & Glasstone 1926, 227). Certains chimistes et physiciens renommés rejetaient encore la théorie atomique au début du 20^{ème} siècle. Pour les chimistes, bien que l'atome soit de fait une entité utilisée dans leur analyse des réactions chimiques, il n'était cependant pas considéré comme réel (ni dans le sens positiviste, ni dans le sens d'une description théorique applicable) mais seulement comme un outil heuristique pour décrire des réactions chimiques, sans contribuer à la compréhension réelle de la matière (Görs 1999).

L'acceptation de l'atome

Bien que certains chimistes acceptèrent l'atome comme hypothèse utile, les physiciens commencèrent à regarder l'atome comme une entité réelle avec un pouvoir explicatif. En particulier, la science de la thermodynamique, en cours de développement, joua un rôle important dans l'établissement d'un atome physique, crucial pour la théorie cinétique dans laquelle la chaleur est représentée par le mouvement des atomes. L'interprétation réaliste fut cependant fortement critiquée, particulièrement dans la communauté scientifique germanophone, par des scientifiques éminents comme Ernst Mach, Wilhelm Ostwald et Georg Helm.⁹ La controverse entre ces importants chercheurs, surtout Ostwald (Prix Nobel en 1909) et Mach, et les partisans d'une interprétation statistique, dont notamment Boltzmann, n'était pas seulement basée sur des problèmes physiques, mais concernait des questions philosophiques profondes. Une question clé était de savoir si les atomes individuels étaient visibles et s'il existait la moindre preuve de l'existence d'atomes individuels.

Au début du 20^{ème} siècle, il semblait que la théorie atomique était en train d'être renversée, et le point de vue de Boltzmann par exemple était considéré comme un relent du 19^{ème} siècle. Cependant, la situation changea de façon significative quand la théorie du rayonnement de Planck fut établie, et qu'Einstein et Smoluchowski publièrent leur interprétation du mouvement Brownien. Ce phénomène avait été décrit par plusieurs observateurs du 18^{ème} siècle, et avait été attribué à, et dénommé en référence au, biologiste Robert Brown, qui au début du 19^{ème}

⁹ Pour d'autres raisons, Max Planck commença également par critiquer l'atomisme comme il le comprenait dans l'interprétation statistique de Boltzmann (voir Müller 2008). Cette discussion ne se limitait pas à la communauté germanophone, un autre exemple d'opposants à l'atomisme est Poincaré.

siècle, se rendit compte que des petites particules de pollen et de poussière à la surface de l'eau se déplaçaient de façon erratique. Le détail remarquable du mouvement de ces particules inanimées était qu'il ne semblait jamais s'arrêter. Pendant un demi-siècle environ, l'interprétation de ce mouvement resta une question ouverte.

Bien que vers la fin du 19^{ème} siècle certains chercheurs proposèrent des solutions à cette question, ce ne fut qu'entre 1905 et 1906 qu'Albert Einstein et Marian Smoluchowski présentèrent indépendamment leurs analyses mathématiques du mouvement Brownien qui correspondent à l'interprétation qu'on en fait à ce jour. En fait, l'article d'Einstein fut l'un des trois articles célèbres de son *annus mirabilis*, les deux autres étant en rapport avec l'effet photoélectrique et la théorie de la relativité restreinte. Les deux chercheurs expliquèrent que le mouvement Brownien pouvait être causé par l'énergie cinétique des particules d'eau. L'explication semblait être le premier effet macroscopique dont l'explication requérait l'utilisation de l'hypothèse de petites particules, servant donc de preuve empirique pour la théorie cinétique, et du coup, pour la théorie atomique également.

On pense qu'Ostwald a été convaincu de l'adéquation de la théorie atomique suite à l'accord entre sa description et les données empiriques. A la même époque environ, un autre exemple de preuve empirique prouva l'adéquation de la théorie atomique, un exemple qui aurait cette fois convaincu Mach: quand des particules radioactives sont placées près d'un écran fluorescent, de petits éclairs lumineux pouvaient être observés, et ceux-ci furent interprétés comme le résultat de l'impact de particules alpha individuelles. En quelques années donc, l'atomisme, de presque entièrement rejeté fut presque entièrement accepté. Boltzmann, le grand partisan de la théorie atomique, ne vit pas l'acceptation générale de la théorie pour laquelle il s'était battu, s'étant suicidé en septembre 1906.

Les atomes eux-mêmes acquièrent une structure

Même avant les travaux d'Einstein et de Smoluchowski qui ont permis de s'accorder sur l'exactitude de la description atomique de la matière, quelques chercheurs avaient établi des résultats empiriques qui contredisaient le principe de l'indivisibilité de l'atome. De fait, les travaux de Faraday sur l'électrolyse effectués dès les années 1830 ont soulevé la question sur la nature fondamentale et indivisible de l'atome tel qu'elle avait été définie par Dalton. D'après les recherches de Faraday, une quantité donnée d'électricité libère une quantité donnée d'un élément lors du processus d'électrolyse, mais ce résultat empirique ne souleva pas la question de la nature atomique de la matière.

Au contraire, la question de savoir si l'électricité peut être expliquée en termes de structure atomique ne sera pas élucidée jusque tard dans le 20^{ème} siècle, pas plus que ne seront investigués les rapports entre la charge électrique et la quantité de matière. Ce n'est que lorsque les mesures de Millikan de la charge électrique élémentaire furent récompensées par un Prix Nobel dans les années 1920 que cette question fut réglée, du moins pour la vaste majorité des scientifiques (voir Holton 1978).

Vers la fin du 19^{ème} siècle, un autre fait expérimental jeta un doute quant au caractère indivisible de l'atome. En réalité, ce constat vient au terme d'une succession de recherches qui peuvent être considérées comme visant à prouver la validité de la théorie atomique, même si historiquement ce n'est pas ainsi qu'elles ont été interprétées. Dans les années 1860, le chimiste Bunsen montra, en collaboration avec le physicien Kirchhoff, que la lumière émise par un matériau est spécifique à ce matériau, et que seules certaines fréquences spécifiques (ou raies spectrales, lorsqu'on analyse un spectre) sont absorbées ou émises. Ceci fournit une méthode permettant

d'identifier de nouveaux éléments, dont le nombre augmenta de façon significative dans les années qui suivirent. L'analyse de spectres était un sujet majeur qui s'étendit également à l'analyse des rayons cathodiques et leur interaction avec des gaz contenus dans des tubes. Les expérimentalistes espéraient grâce à cela développer une meilleure compréhension de la composition de la matière (Müller 2004).

En particulier, l'analyse des rayons cathodiques semblait prometteuse. Parmi les chercheurs travaillant sur ce sujet, il y avait J.J. Thomson. Il analysa les rayons cathodiques et établit qu'ils étaient formés de particules¹⁰ d'une masse d'environ 1/1000 de celle de l'atome d'hydrogène. Il put également déterminer leur rapport masse/charge en déviant les particules à l'aide d'un champ magnétique. Plus important encore, il expérimenta avec différents matériaux pour la cathode, qui émettaient les rayons quand la cathode était chauffée, ceux-ci étant ensuite accélérés par un champ électrique. Thomson montra que toutes les particules avaient à peu près les mêmes propriétés, peu importe le matériau dont la cathode était faite. On peut voir ceci comme une indication que ces particules (corpuscules, comme il les appela) étaient un constituant fondamental de la matière. Il était cependant problématique d'imaginer un atome stable contenant ces corpuscules légers et électriquement chargés. Thomson arriva finalement à une solution: "On suppose que l'atome est constitué d'un certain nombre de corpuscules se déplaçant dans une sphère d'électrification positive uniforme..." (Thomson 1904, 255).¹¹ L'implication de cette hypothèse était que l'atome n'était plus indivisible et que le modèle de l'atome devrait être modifié.

¹⁰ De manière assez remarquable, son fils, George Paget Thomson, reçut également le Prix Nobel de physique, cette fois pour son travail sur la diffraction des électrons. D'une certaine manière on pourrait dire (de façon très simplifiée), que J.J. Thomson reçut le Prix Nobel pour avoir démontré que les électrons étaient des particules, et que son fils reçut le même honneur pour avoir démontré que ceux-ci n'étaient pas des particules mais avaient des caractéristiques ondulatoires.

¹¹ En fait, le physicien Japonais Nagaoka avait formulé une solution similaire un an plus tôt.

Avec l'émergence du domaine de la radioactivité au début du 20^{ème} siècle, une autre modification du modèle atomique devint nécessaire. Un des chercheurs qui fit carrière scientifique en analysant la radioactivité était le Prix Nobel Ernest Rutherford, un physicien de Nouvelle Zélande, qui commença ses recherches au Canada avant de déménager en Angleterre. Au laboratoire de Cavendish, deux de ses assistants - Geiger et Marsden - effectuaient des expériences pour disperser des particules alpha à l'aide d'une feuille métallique (Geiger & Marsden 1909).

Rutherford suspectait déjà que la dispersion était possible suite à son observation du passage de particules alpha à travers des feuilles de mica. Cette expérience fut donc recommencée, et le résultat en fut très troublant, bien qu'il ne fut pas entièrement inattendu. Pour l'expérience, Geiger et Marsden utilisèrent une feuille d'or, car elle pouvait être rendue très fine. Ils observèrent que bien que la vaste majorité des particules alpha passaient à travers la feuille de métal, certaines étaient dispersées, il y en avait même quelques unes qui étaient réfléchies. Heilbron fait remarquer que:

En rétrospective, la découverte de Marsden était "l'événement le plus incroyable" qui lui soit jamais arrivé [Rutherford, PH], presque aussi incroyable, disait-il, que si un obus de 40cm tiré sur une feuille de papier rebondissait et touchait l'artilleur. On peut aisément voir grâce à un cours de Rutherford, qu'il délivra six mois après la découverte de la réflexion diffuse, que l'imagerie militaire et l'incrédulité sont des fabrications ultérieures (1981, 264f.)

Le résultat de l'expérience était certainement inattendu pour la communauté scientifique, et Rutherford formula une explication qui était tout aussi inattendue: il calcula, d'après le comportement des particules alpha, que l'atome avait un noyau positivement chargé de très petite taille contenant presque toute sa masse, et que le reste de l'espace occupé par l'atome était vide à

l'exception des électrons qui se déplaçaient dans cet espace.

Les atomes peuvent se désintégrer

Si Rutherford est célèbre pour ses recherches sur la radioactivité, le premier chercheur à observer ce phénomène fut en réalité le physicien Français Henri Becquerel. On peut utiliser le terme "découverte" pour caractériser sa première observation, car elle était totalement inopinée, même si une certaine conscience des effets de radiation existait suite à la démonstration des rayons X par Röntgen. La découverte de Becquerel ouvrit un nouveau domaine scientifique, qui ne fut immédiatement exploré ni par lui ni par d'autres, car le rayonnement émis par les sels d'uranium était simplement considéré comme une curiosité ne méritant pas plus d'attention scientifique.

Ce fut la jeune chimiste polonaise Marie Skłodowska, en collaboration avec le physicien Français Pierre Curie, qui mit ce nouveau domaine au premier plan. Marie et Pierre Curie conclurent que certains des échantillons radioactifs devaient contenir d'autres éléments que l'uranium, car la radiation émanant de certains était plus forte que celle émanant d'un échantillon d'uranium pur. Grâce à une longue et laborieuse analyse, ils furent à même de préparer des échantillons pur de polonium et de radium, identifiés grâce à leur spectre.

Le Radium en particulier se retrouva au centre de la recherche dans le nouveau domaine de la radioactivité à cause de son activité relativement élevée et des rayons qu'il produisait, différents de ceux produits par l'uranium. Il devint évident que beaucoup d'autres éléments étaient capables d'émettre une telle radiation. Il y eut plusieurs autres trouvailles plus étonnantes, parmi elles la transformation d'un élément en un autre, suite à

une désintégration alpha ou beta, comme raconté dans l'anecdote suivante:

Rutherford et Soddy constatèrent par exemple que le Thorium radioactif se transformait petit à petit en Radium, atome par atome. Au moment où il comprit ceci, Soddy ... s'exclama: ' Rutherford, c'est de la transmutation!' 'Pour l'amour de Dieu, Soddy,' répliqua son collègue, 'n'appelle pas ça transmutation, on va finir pendus comme alchimiste.' (Weart 1988, 5f.)

Le travail des Curie avait déjà établi une idée fondamentale: que la radiation d'un matériau est liée à certaines propriétés de cet élément. L'Uranium émettait un type de radiation différent que le Polonium et que le Radium, et ainsi de suite. De plus, à travers les expériences, on se rendit compte que l'activité d'un échantillon diminue avec le temps, ce qui est clair quand la transformation d'atomes d'un élément en atomes d'un autre est prise en compte. Un problème en rapport avec cette activité décroissante était que la demi-vie n'était pas une valeur applicable à un atome individuel. La loi de la désintégration radioactive ne s'applique qu'à un échantillon statistique, et il est donc impossible de prédire le comportement d'un atome individuel.

Au départ on considéra que c'était une indication que la physique atomique était encore incomplète; cependant, au final, il devint clair que la prédiction du comportement d'un atome seul était tout simplement impossible et que la désintégration ne pouvait être expliquée mathématiquement qu'en termes statistiques sur un ensemble d'atomes.

Dans l'analyse des radiations, trois types différents furent identifiés et rapidement caractérisés. De façon surprenante, les rayons alpha étaient en fait des noyaux d'Helium, un élément « déshabillé de ses électrons » qui jusque là n'avaient été détecté que dans le soleil, grâce à des méthodes spectroscopiques, et semblait ne pas exister sur Terre. Que les rayons alphas soient des particules positives alors que les rayons beta étaient des électrons chargés

négativement impliquaient qu'un atome pouvait non seulement émettre de la matière négative mais également de la matière positive.

Atomes physique et atomes chimiques

La détermination des propriétés des différents rayonnements fut l'une des premières tâches que les expérimentateurs entreprirent dès qu'il fut évident que la radioactivité deviendrait un champ de recherches important. Parmi d'autres choses, la masse et la charge des particules formant les rayonnements furent déterminées. Ceci fut réalisé à l'aide d'un champ magnétique bien défini positionné perpendiculairement à la direction des rayons. Grâce à la déflexion, on put déterminer le rapport masse-charge des particules.

On utilisa un système comparable pour analyser les atomes, ce qui donna un autre aperçu de leur structure et résolut un des problèmes restants.

Particulièrement à travers les travaux de Francis Aston qui modifia le système utilisé pour déterminer le rapport masse-charge pour en faire un spectromètre de masse, on put comprendre que même si tous les atomes d'un élément étaient semblables d'un point de vue chimique, ce n'était pas le cas d'un point de vue physique. Aston démontra en effet que pour plusieurs éléments, il existait différents atomes qu'on ne pouvait distinguer que par leur masse. Ceci aida à expliquer le poids atomique de certains éléments qui n'était pas égal à un multiple entier de la masse de l'atome hydrogène. Grâce aux données d'Aston, il devint évident que le poids atomique était la moyenne pondérée de la masse des atomes constituants, déjà prédits et appelés isotopes par Soddy, le collaborateur de Rutherford. Ce calcul montra que le poids atomique de chacun des isotopes était, avec une certaine précision, un multiple entier du poids de l'atome d'hydrogène.

Les atomes peuvent être transmutés

Alors que la plupart des expériences avec les substances radioactives avaient pour ambition d'analyser les radiations, certains chercheurs tentèrent de modifier l'atome par une action extérieure, d'induire une désintégration, ce qu'on appelle la radioactivité artificielle. Au départ, on utilisa des particules α pour bombarder la matière. On observa que certains atomes étaient capables d'intégrer la particule α , formant de ce fait un autre élément. Le premier à établir ce fait fut, une fois encore, Rutherford, qui démontra que quand des particules α étaient envoyées sur de l'azote, on pouvait détecter de l'hydrogène et de l'oxygène. L'interprétation que Rutherford faisait de ce constat était que le noyau d'azote absorbait une particule α et que le noyau nouvellement formé émettait aussitôt un noyau d'hydrogène. Cette expérience constitua la première tentative réussie de transformer un élément tout en en créant un autre, réussite qui fut rapidement suivie de nombreuses autres expériences similaires. Il faut néanmoins bien comprendre qu'il ne s'agit pas de fission nucléaire – quelque chose qui était considéré comme impossible.

Rutherford donna le nom de proton au noyau d'hydrogène et postula que ce proton était un composant élémentaire de tous les noyaux. Que la masse des noyaux ne corresponde pas à un multiple de la masse du proton était toujours problématique. Il restait à comprendre comment un noyau pouvait être formé uniquement de protons positifs, et comment une désintégration bêta pouvait être expliquée. Rutherford supposa que les électrons existaient également dans le noyau et formaient des paires avec des protons, et que ces paires permettaient de garder les particules élémentaires du noyau ensemble.

Parmi les chercheurs qui essayèrent d'étudier le noyau et l'atome à travers l'interaction avec les particules alpha se trouvaient Irène Joliot-Curie (fille de Marie Curie) et son mari, Frédéric. Ils ré-

pétèrent certaines expériences qui avaient déjà été effectuées à Berlin. En irradiant du Beryllium avec des particules alpha, ils observèrent une radiation importante, qu'ils supposèrent au départ être des rayons gamma. Les particules formant cette radiation n'étaient pas chargées et semblaient avoir une énergie extrêmement élevée. Non chargées, ces particules pouvaient néanmoins interagir avec l'hydrogène et libérer des électrons.

Bien que les Joliot-Curies soutinrent que leurs expériences produisaient de la radiation gamma, James Chadwick, qui travaillait avec Rutherford, choisit une autre interprétation. D'après lui, cette radiation pouvait être expliquée par un nouveau corpuscule responsable d'un tout nouveau type de radiation. Les expériences suivantes montrèrent que les particules avaient une masse similaire à celle du proton et pouvaient être les particules remplaçant la paire proton-électron que Rutherford supposait responsable de l'équilibre relatif du noyau.

La découverte et l'isolation du neutron ouvrirent le champ à de nouvelles expériences sur la transmutation, car l'absence d'une force électrostatique répulsive éliminait le problème d'injection d'une particule alpha dans le noyau, et permettait donc la création de nouveaux isotopes radioactifs et produits de désintégrations. Parmi les chercheurs de ce domaine, il y avait les Joliot-Curie à Paris, Fermi en Italie, et Hahn et Strassmann à Berlin. Tous avaient pour objectif d'injecter un neutron dans un noyau d'Uranium, l'élément le plus lourd connu à cette époque. L'objectif était de produire les éléments « trans-uraniques », avec un nombre atomique supérieur à celui de l'Uranium, ce qui semblait être la seule possibilité pour développer de nouveaux éléments car la table périodique était considérée comme complète.

De ces chercheurs, Hahn, un chimiste, était le plus déçu par ses résultats: il semblait qu'à travers ses expériences, l'Uranium avait été transformé en Baryum, qui avait un poids atomique significativement moins élevé que l'Uranium.

Hahn décrit ce problème dans une lettre à sa collègue de toujours, la physicienne Lise Meitner, qui venait de déménager en Suède, fuyant le danger fasciste Allemand après l'Anschluss de l'Autriche. Meitner commença par répondre qu'un tel résultat ne semblait pas plausible,¹² mais, comme elle le fit remarquer dans la même lettre, il y avait déjà eu tant de surprises dans l'histoire de la radioactivité qu'on pouvait difficilement dire qu'une chose ou l'autre était impossible. Hahn insista qu'il avait bien vérifié la présence de Baryum, et Meitner fit remarquer dans une autre lettre, écrite quelques jours plus tard, qu'au moins dans le contexte de l'énergie, il aurait pu s'agir de fission. Dans une discussion qu'elle eut avec son neveu, Otto Frisch, Meitner formula l'idée que le modèle de l'atome devait peut-être être pensé comme une goutte: si un objet avec suffisamment d'énergie frappait cette goutte, l'impact la séparerait en plus petites gouttes.

Finalement, Hahn publia ses résultats en collaboration avec Strassmann, et souligna que pour lui, en tant que chimiste, il devrait affirmer que les isotopes produits se comportaient comme du Baryum; mais, du point de vue de la physique, insistait-il, il n'était toujours pas convaincu que cet élément pouvait être produit au cours d'une telle expérience. Les perspectives changèrent rapidement, et peu après les scientifiques remarquèrent qu'une quantité substantielle d'énergie devait être libérée lors d'une telle réaction nucléaire ainsi que d'autres neutrons, ce qui débouchait sur la possibilité d'une réaction en chaîne.

Remerciements

Je suis redevable à D. Metz d'une révision approfondie du contenu de ce document ainsi qu'à ses commentaires sur une version antérieure. Cathrine Froese Klassen et Stephen Klassen doivent être remerciés pour une relecture détaillée du texte.

¹² Before these experiments were carried out, however, the concept of nuclear fission had already been formulated by Ida Noddack in 1934 when she was criticizing the discussion of Fermi in his experiments on transuranic elements.

- Berr, F., & Pricha, W. (1997). *Atommodelle* (3. Auflage). München: Deutsches Museum.
- Blackmore, J. (1995). *Ludwig Boltzmann: His Later Life and Philosophy, 1900-1906. The Philosopher*. Dordrecht: Kluwer.
- Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M. L. (1963). *The Feynman lectures on physics*. Reading, Mass.: Addison-Wesley Publishing Company.
- Geiger, H., & Marsden, E. (1909). On a Diffuse Reflection of the α -Particles. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 82(557), 495–500.
- Görs, B. (1999). Chemischer Atomismus: Anwendung, Veränderung, Alternativen im deutschsprachigen Raum in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts. Berlin: ERS.
- Heidelberger, M. (1993). *Die innere Seite der Natur : Gustav Theodor Fechners wissenschaftlich-philosophische Weltauffassung*. Frankfurt am Main: Klostermann.
- Heilbron, J. L. (1981). *Historical studies in the theory of atomic structure*. New York: Arno Press.
- Holton, G. J. (1978). *The scientific imagination: case studies*. Cambridge [Eng.]; New York: Cambridge University Press.
- Lavoisier, A. L. (1794). *Elements of Chemistry*. Transl. by Kerr, 4th ed., Edinburgh: William Creech.
- Losee, J. (2001). *A historical introduction to the philosophy of science*. Oxford [Engl.]; New York: Oxford University Press
- Morgenweck-Lambrinos, V., & Trömel, M. (2001). Wissenschaft und Legende: eine Nachbetrachtung zu Lise Meitner, Otto Hahn und die Kernspaltung: eine Legende aus unseren Tagen. *NTM*, 9, 29–40.
- Müller, F. (2004). *Gasentladungsforschung im 19. Jahrhundert*. Berlin: Verlag für Geschichte der Naturwissenschaften und der Technik.
- Müller, I. (2008). Ein Leben für die Thermodynamik. Vom Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik zum Planckschen Wirkungsquantum. In: *Physik Journal* 7/3, 39–45.
- Nye, M. J. (1993). *From chemical philosophy to theoretical chemistry: dynamics of matter and dynamics of disciplines, 1800-1950*. Berkeley: Univ. of California Press.
- Rife, P. (1992). *Lise Meitner: Ein Leben für die Wissenschaft*. Hildesheim: Claasen.
- Shapin, S., & Schaffer, S. (1989). *Leviathan and the Air-Pump: Hobbes, Boyle, and the Experimental Life* (1st Paperback Edition). Princeton: University Press.
- Sichau, C. (2005). *Atomphysik : historische und fachliche Materialien zur Unterrichtsvorbereitung*. Oldenburg: Didakt. Zentrum (diz).
- Simonyi, K. (1995). *Kulturgeschichte der Physik: von den Anfängen bis 1990* (2. Aufl.). Thun, Frankfurt/Main: Deutsch.
- Thomson, J. J. (1904). "On the structure of the atom: an investigation of the stability ...". In: *Philosophical Magazine* 6, 7(39), 237–265.
- Tilden, W. A., & Glasstone, S. (1926). *Chemical discovery and invention in the twentieth century*. London: Routledge.
- Weart, S. R. (1988). *Nuclear fear: a history of images*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press.

La traduction a été réalisée par Ludovic Urbain et relue par Brigitte Van Tiggelen et Mathilde Urbain

Historical Background: *Atoms* was written by Peter Heering with the support of the European Commission (project 518094-LLP-1-2011-1-GR-COMENIUS-CMP) and the University of Flensburg, Germany. This publication reflects only the views of the author, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.

¹³ On trouvera quelques extraits audio avec les voix des protagonistes tels que Thomson, Rutherford, Hahn, etc. sur le site <http://www.aip.org/history/mod/fission/fission1/01.html>