

Communication de
Monsieur Jean-Louis Rivail



Séance du 4 mars 2016



L'histoire exemplaire de l'atomisme moderne

La notion d'atome, qui de nos jours fait partie de la culture, ne s'est imposée qu'après plusieurs siècles de débats au terme d'un processus inhabituel dans l'histoire des sciences physiques.

L'hypothèse d'une structure discontinue de la matière, formée de corpuscules élémentaires insécables, les atomes, proposée par Leucippe et Démocrite puis développée par Epicure et Lucrèce, a longtemps été ignorée en Occident car le seul philosophe grec qui avait droit de cité dans l'enseignement scolastique était Aristote, défenseur de la matière divisible à l'infini. Cependant, des esprits éclairés comme Giordano Bruno, Galilée ou Montaigne s'intéressèrent à la philosophie d'Epicure, et la question des atomes commença à être discutée au début du XVII^e siècle ; mais le débat concernant l'existence possible des atomes était essentiellement de nature métaphysique. Dans ce contexte, des penseurs commençaient à poser le problème de la nature discontinue de la matière en termes plus scientifiques.

XVII^e siècle, les premiers faits objectifs

Avant d'aborder comment le problème de l'atomisme s'est progressivement imposé dans la pensée scientifique, il convient de s'arrêter un peu sur un personnage d'une grande importance mais mal connu : Pierre Gassend dont le patronyme a été latinisé en Gassendi (1592-1655). Chanoine du chapitre de Digne, il naît près de cette ville dans une famille de paysans. Il étudie

aux universités de Valence et d'Aix-en-Provence où il suit, entre autres, l'enseignement de Claude Fabri de Peiresc, un élève de Galilée à Padoue, et il commence à se passionner pour l'astronomie – domaine dans lequel il fera des découvertes majeures – avant d'aborder beaucoup d'autres sujets : les mathématiques, la philosophie et la théologie.

En 1645 il est appelé à Paris pour occuper la chaire de mathématiques et astronomie du Collège Royal (l'actuel Collège de France). Il fréquente le cercle de Mersenne, Roberval, le jeune Pascal ainsi que des philosophes anglais réfugiés en France pendant la révolution anglaise, dont Hobbes avec qui il se lie d'amitié. Sa philosophie est aux antipodes de celle de Descartes, qui le méprisait. Pour lui la réflexion philosophique doit partir de constatations, de faits avérés. Il considère que l'espace a une définition absolue, indépendante des objets qui s'y trouvent, ainsi que le temps qui est un flux, indépendant de son contenu. Ces notions seront celles de la mécanique classique jusqu'au début du XX^e siècle et ont été reprises par Newton qui les a reçues de son maître Barrow, faisant explicitement référence à Gassendi. A ce titre on peut dire que Gassendi est le maillon qui relie Galilée à Newton.

A la suite d'Epicure, Gassendi est évidemment atomiste et c'est là qu'il faut signaler une observation qui, pour la première fois, étaye cette hypothèse. En 1635, avec son ami Peiresc, il procède à des expériences de cristallisation, en particulier de sel marin et d'alun et remarque que les cristaux obtenus, de tailles différentes, ont des caractéristiques géométriques constantes et, faisant un passage à la limite, il en conclut qu'ils dérivent d'un constituant élémentaire qu'il nomme atome, terme qui a une acception différente de celle que nous utilisons, mais cette observation conforte l'existence de constituants élémentaires de la matière, donc d'une représentation discontinue de celle-ci. Il remarque : « *Ces gros solides soient cubiques, soient octohedriques, ou autres, sont tous composez d'autres moindres jusques à la resolution en de si menus, qu'ils sont presque insensibles et tousjours figurez de mesme, dont je conclus que ceux cy se vont encore resolvant jusques aux atomes, qui par quelque sorte de nécessité doivent estre de mesme figure* ». C'était, près de deux siècles avant René Just Haüy, la notion de maille cristalline élémentaire. Il va même jusqu'à imaginer des agrégats d'atomes ayant une structure définie qu'il nomme « corpuscules ». C'est ce qui correspond à la notion moderne de molécule.

Un sujet de nombreux débats à propos de l'hypothèse défendue par Epicure et ses adeptes est la question du vide ; car si la matière est faite de corpuscules, il doit régner du vide dans les interstices et cette question était très discutée. Tout le monde a en tête la célèbre affirmation « *la nature a horreur du vide* ». Descartes qui rejetait l'épicurisme réfutait cette hypothèse en ces termes : « *il n'est pas possible que ce qui n'est rien ait de l'extension* ».

Au début du XVII^e siècle à Florence on constate que les pompes aspirantes, destinées à élever l'eau de l'Arno pour alimenter les fontaines de la ville, sont inefficaces lorsque la dénivellation dépasse un peu plus de dix mètres, en dépit de toutes améliorations techniques. Galilée, sur le déclin, ne s'intéresse pas au problème et les fontainiers se retournent alors vers son élève : Evangelista Torricelli (1608-1647). Celui-ci décide de faire une expérience en utilisant un liquide beaucoup plus dense que l'eau : le mercure. En 1643 il fait réaliser un tube de verre d'environ un mètre, fermé à une extrémité, qu'il remplit de mercure et retourne sur une cuve remplie du même liquide. Il constate que la colonne de mercure dans le tube s'élève à environ 760 mm, libérant un espace vide entre l'extrémité de la colonne de mercure et le fond du tube. Les atomistes y virent la preuve de l'existence du vide et Pascal reprit l'expérience dans différentes conditions, ce qui le conduira à écrire un *Traité du vide* en 1651.

Il convient d'ajouter à la liste des observations physiques effectuées à cette époque, la loi de compressibilité des gaz formulée en 1662 par l'Irlandais Robert Boyle (1627-1691) et presque simultanément par Edme Mariotte (1620-1684). Cette loi précise que le produit de la pression par le volume est une constante qui ne dépend que de la température mais pas de la nature du gaz, toutes choses égales par ailleurs. Mais cette loi, qui assurait les atomistes dans leurs convictions, n'a reçu une interprétation en termes moléculaires qu'un siècle et demi plus tard, en 1811 par Amadeo Avogadro.

L'entrée en scène de la chimie

Le débat, à caractère essentiellement philosophique et métaphysique se continuera pendant tout le XVII^e siècle et une partie de XVIII^e, avec des antiatomistes notoires, tels Descartes, Leibniz, Berkeley et même Kant après avoir été en faveur de l'atomisme, et des atomistes parmi lesquels on peut citer le Hollandais Huygens et les Anglais Newton, Bentley, Locke.

Au Siècle des Lumières les réflexions sur la constitution de la matière faisaient toujours appel aux quatre « substances primaires » d'Empédocle (eau, air, terre, feu) et aux trois « principes » de Paracelse (mercure, soufre et sel) bien que, dès 1661, Boyle, dans son livre *The Sceptical Chymist* réfutait l'appellation d'élément aux substances primaires sans, malheureusement, proposer d'autres substances pour les remplacer. Par ailleurs, le phlogistique était toujours invoqué pour expliquer la réduction des oxydes en métal.

Progressivement, les idées vont évoluer sur la base de très nombreuses expériences mettant en jeu des pesées et des mesures de volumes de gaz très précises pour l'époque, dont l'interprétation fondée sur la théorie du phlogistique, a fait que leurs auteurs sont passés à côté de grandes découvertes.

On peut citer les expériences sur l'oxydation des métaux du Danois Carl Wilhelm Scheele (1742 – 1786) de l'Anglais Joseph Priestley (1733-1804) qui, reprises en 1774 par Antoine-Laurent de Lavoisier (1743-1794) le conduisirent, en rejetant l'hypothèse du phlogistique, à la découverte de l'oxygène et de l'azote composant l'air. Un pas important est franchi lorsque simultanément l'Anglais Henry Cavendish (1731-1810) et Lavoisier montrent que l'eau est un composé d'hydrogène et d'oxygène ce qui met à mal sa qualité d'élément. Dans le *Traité élémentaire de chimie* (1789), Lavoisier donne une définition précise de l'élément : « *Nous attacherons au nom d'éléments ou de principes des corps l'idée du dernier terme auquel parvient l'analyse ; toutes les substances que nous n'avons encore pu décomposer par aucun moyen, sont pour nous des éléments* ». Il propose une liste de 33 éléments parmi lesquels il met la lumière et le calorique ainsi que cinq substances qui, ultérieurement, se révéleront être des composés. Par ailleurs, à la suite d'études pondérales minutieuses, il formule la loi de conservation des masses.

Ces travaux n'apportent pas de nouvelles preuves de l'existence d'atomes, mais en fondant la chimie sur des bases solides, ils contribueront fortement à clarifier le débat.

Le dix-neuvième siècle.

C'est sur ces fondements que se termine le Siècle des Lumières et que commence le suivant qui sera déterminant. La loi de conservation des masses à fait accomplir à la chimie des progrès importants en permettant tout d'abord à Jeremias Benjamin Richter (1762-1807) d'énoncer dès 1791 une loi dite des équivalents puis à Joseph-Louis Proust (1754-1826) celle des proportions définies (1806) et à John Dalton (1766-1844) celle des proportions multiples. Toutes ces lois portent sur des rapports de masses de corps entrant en réaction. Elles permettront rapidement d'affecter à chaque élément une masse de référence que l'on nommera masse atomique.

Par ailleurs, à partir de mesures de volumes de gaz, Louis Joseph Gay-Lussac (1778-1850) énonce en 1809 des lois qui s'apparentent aux précédentes mais qui portent sur des rapports de volumes de gaz interagissant. Or les gaz ont en commun une propriété remarquable : leur compressibilité qui fait que le produit de la pression par le volume est une constante qui ne dépend que de la température mais pas de la nature du gaz. Partant de ces constatations, Amadeo Avogadro (1776-1856) proposa en 1811 que « *tous les gaz considérés dans les mêmes conditions de température et de pression renferment, à volumes égaux, le même nombre de molécules intégrantes* », proposition formulée à la même époque en termes équivalents par André-Marie Ampère (1775-1836). Mais la

distinction entre atome et molécule n'est pas assurée et les deux termes ont, dans le langage de l'époque, un sens plus ou moins identique, au demeurant assez vague. Ceci a, entre autres, comme conséquence que la situation demeure assez ambiguë. Ainsi, selon le point de vue que l'on adopte, la formule de l'eau s'écrit soit HO, soit H₂O et même H₂O₂, ce qui conforte les antiatomistes qui ne raisonnent qu'en termes d'équivalents. Cette situation perdure plus ou moins pendant tout le début du XIX^e siècle, malgré quelques avancées comme la loi de Dulong et Petit qui corrèle la chaleur spécifique des métaux purs à leur masse atomique.

C'est pour tenter de mettre fin à une certaine confusion que August Kékulé (1820-1896) en Belgique eut l'idée de convoquer un congrès international dont la lettre d'invitation était signée par plusieurs chimistes européens dont, pour la France, Balard, Boussingault, Dumas, Frémy, Pasteur, Pelouze et Wurtz. Ce congrès, le premier du genre dans l'histoire, se tint à Karlsruhe du 3 au 5 septembre 1860 et réunit 140 participants dont 21 Français parmi lesquels le nancéien Jérôme Nicklès. Au cours des débats l'Italien Stanislao Canizzaro (1826-1910) lut un mémoire intitulé « *Sunto di un corso di filosofia chimica* » qui établissait clairement la distinction entre atome et molécule et proposait la méthode d'Avogadro pour déterminer les masses moléculaires des composés pouvant exister sous forme gazeuse. Cette approche permet clairement de mettre en évidence le fait que certains éléments gazeux existent sous forme moléculaire polyatomique : diatomique comme l'hydrogène, l'oxygène ou l'azote, ou même tétraatomique (le phosphore). Cela permet d'affecter une masse fictive à chaque élément : 1 pour l'hydrogène, 12 pour le carbone, 16 pour l'oxygène... représentant un nombre identique d'atomes, et si cette masse est exprimée en grammes ce nombre est appelé Nombre d'Avogadro.

On considère que cette date est celle de la naissance de la chimie moderne. Par la suite d'autres découvertes vinrent compléter la liste des méthodes de détermination des masses moléculaires, comme les lois de Raoult (1878) portant sur certaines propriétés de solutions moléculaires (température de congélation, d'ébullition ou tension de vapeur).

L'hypothèse atomique, associée aux méthodes d'analyse élémentaire, permettait alors de rationaliser de plus en plus de propriétés chimiques en transcrivant les nombreuses observations par des schémas faisant apparaître l'agencement des atomes dans les molécules au moyen de liaisons et dans lesquels chaque élément possède un nombre fixe de liaisons possibles. Sur ce point, il convient de signaler les contributions importantes d'Auguste Laurent (1807-1853) et de Charles Gerhardt (1816-1856). Il devint même possible d'imaginer des structures tridimensionnelles grâce au concept de « carbone tétraédrique »

proposé par Le Bel et van t'Hoff (1874) pour expliquer la découverte par Pasteur de molécules chimiquement identiques mais dotée d'un pouvoir rotatoire opposé. Ce concept de structure atomique des molécules et la notation qu'il permettait a fait faire à la chimie organique des progrès importants. Ainsi, Charles Adolphe Wurtz (1817-1884) déclarait à l'Académie des Sciences en 1877 « *La notation atomique est fondée, non sur telle ou telle considération choisie arbitrairement ; elle repose sur un ensemble de données chimiques et physiques. Quant à l'hypothèse atomique qui donne un corps à cette notation, qui oserait méconnaître l'influence qu'elle a exercée, qu'elle exerce toujours dans le domaine de la Science* ».

De leur côté, les physiciens ont rapidement adopté l'hypothèse atomique. Dès le XVIII^e siècle des tenants de l'atomisme avaient remarqué que la structure discontinue de la matière permettait d'interpréter certains phénomènes physiques. On peut citer par exemple Daniel Bernoulli (1700-1782) qui faisait remarquer que la pression des gaz pouvait être due aux chocs des atomes (ou des molécules) sur les parois des récipients qui contiennent le gaz. Cette remarque a été mise en forme au XIX^e siècle par des théoriciens comme Rudolf Clausius (1822-1888) et James Clerk Maxwell (1831-1879) fondateurs de la théorie cinétique des gaz qui a beaucoup contribué à asseoir ce qui n'était encore que l'hypothèse atomique. En particulier Johan Joseph Loschmidt (1821-1895) partant de mesures physiques sur les gaz, comme la compressibilité ou la viscosité, pouvait donner dès 1865 une première estimation du nombre d'Avogadro ainsi que des dimensions des molécules.

Les dernières batailles

Au vu de ces avancées on pourrait penser que le problème de l'atomisme était définitivement réglé. En réalité, il n'en a rien été et les antiatomistes ne désarmaient pas, un peu partout en Europe, mais surtout en France où ils avaient à leur tête certains chimistes bien établis dans le système académique comme Henri Sainte-Claire Deville (1818-1881) et surtout Marcellin Berthelot (1827-1907). Ils durent cependant se résoudre à utiliser la notation atomique et les formules développées devenues un langage commun à tous les chimistes, mais ils s'acharnaient à n'y voir qu'une écriture symbolique, sans rapport avec la réalité. Ainsi Berthelot pouvait encore écrire en 1898, à propos de cette notation : « *Les développements qu'elle a reçus, l'usage qui en est fait dans la plupart des travaux de chimie publiés actuellement, montrent que les avantages pratiques de son emploi font oublier l'inconvénient qu'elle présente de porter l'esprit à confondre les faits avec les hypothèses, la notation atomique étant, dans une certaine mesure, inséparable de la théorie atomique* ».

On peut expliquer cet ostracisme contre l'atomisme par l'influence de la philosophie positiviste d'Auguste Comte. Celui-ci assigne à la science la mission de répondre à la question « comment » mais lui interdit de s'intéresser au « pourquoi ». De fait, la science jusqu'alors était toujours partie d'un phénomène parfaitement identifié pour établir les lois de l'optique, de l'électricité, du magnétisme et de la gravitation. A propos de cette dernière Auguste Comte écrit : « *Quant à déterminer ce que sont en elles-mêmes cette attraction et cette pesanteur, quelles en sont les causes, ce sont des questions que nous regardons comme insolubles, qui ne sont plus du domaine de la philosophie positive, et que nous abandonnons avec raison à l'imagination des théologiens, ou aux subtilités des métaphysiciens* ». Le malheur est que cette philosophie a eu un écho auprès de scientifiques distingués et en particulier de Berthelot qui, outre son œuvre scientifique importante, a été ministre de l'instruction publique et, à ce poste, a pesé sur l'enseignement de la chimie longtemps après qu'il a quitté son poste ministériel. Gaston Bachelard décrivait la situation qui prévalait encore dans le premier quart du XX^e siècle : « *La plupart des livres scolaires, suivant en cela d'étranges instructions ministérielles, reportaient l'hypothèse atomique à la fin du chapitre consacré aux lois de la chimie. Souvent même l'hypothèse atomique figurait en appendice pour bien marquer qu'on devait enseigner la chimie dans la bonne forme positiviste, par les faits et seulement par les faits. On devait exposer les lois des combinaisons pondérales – lois si simples, si claires, si bien enchaînées dans l'intuition atomique – en se gardant de toute référence à l'intuition. L'adresse consistait à ne pas prononcer le mot d'atome. On y pensait toujours, on n'en parlait jamais.* »

Pour clore le débat, Jean Perrin (1870-1942) publia en 1912 son ouvrage célèbre « Les Atomes » dans le but de défendre l'atomisme. Il cite 13 théories de phénomènes physicochimiques parmi lesquelles celle du mouvement brownien d'Albert Einstein, celle du bleu de ciel et celles découlant de la théorie cinétique des gaz, conduisant à des déterminations du nombre d'Avogadro, concordantes, aux erreurs expérimentales près. L'hypothèse devenait chaque jour un peu plus la théorie.

Dans le même temps, des découvertes venaient apporter des informations sur la nature des atomes. Il y eut presque simultanément celle de l'électron par Joseph John Thomson (1856-1940) et la mise en évidence de son caractère corpusculaire en 1897 par Jean Perrin, qui l'appelait l'atome d'électricité. Vint alors le modèle atomique de Rutherford d'un noyau autour duquel gravitent des électrons, mais la physique classique ne pouvait pas expliquer sa stabilité, ni les spectres d'émission lumineuse des atomes. La découverte par Louis de Broglie (1892-1987) que l'électron était à la fois une onde et une particule et la formalisation mathématique de cette découverte par Erwin Schrödinger (1887-

1961) permis de décrire exactement les propriétés de l'atome d'hydrogène et, par la suite, de tous les atomes de la classification périodique.

De nos jours, des techniques comme la spectrométrie de masse permettent de déterminer la masse individuelle d'un atome ou d'une molécule, et plus récemment une technique comme la microscopie à effet tunnel permet de mettre en évidence et même de manipuler des atomes individuellement à la surface d'un solide.

L'existence et la structure des atomes étant maintenant établies, c'est au noyau atomique de révéler ses secrets. Il y eu d'abord la découverte en 1896 du phénomène de radioactivité par Henri Becquerel (1852-1908) puis, en 1922 celle des isotopes par Francis William Aston (1877-1945) et, par la suite, la théorie et la mise en évidence des particules élémentaires constituant ces noyaux. Mais l'histoire n'est pas finie, comme l'a montré récemment la manifestation expérimentale du boson de Higgs.

Une histoire exemplaire

Partie d'une intuition vieille de près de vingt-cinq siècles et contraire au sens commun, l'hypothèse d'une structure particulière de la matière s'est peu à peu imposée au point de faire, de nos jours, partie d'un socle commun de connaissances.

Le long chemin semé d'embûches qu'ont eu à parcourir ceux que l'hypothèse atomique avait séduits, illustre un mécanisme de pensée original dans l'histoire des sciences. C'est en effet la première fois, en sciences physiques, qu'une théorie n'a pas pour objet d'expliquer directement un phénomène observé mais qu'elle est proposée comme guide d'exploration de ce monde fascinant que l'on nomme chimie. Le succès de la théorie atomique a coïncidé avec l'avènement de la physique moderne et ce n'est sans doute pas un hasard car il ne fait pas de doute qu'il a libéré la pensée du corset des dogmatismes. Il est devenu beaucoup moins suspect de faire des hypothèses qui ne pourront être vérifiées que beaucoup plus tard. L'histoire des ondes gravitationnelles en est un exemple, on ne peut plus actuel.

Cette histoire est enfin exemplaire en ce qu'elle illustre les blocages qu'une idéologie peut créer dans une société, même dans un domaine où on l'attend le moins, celui de la science.

Bibliographie

- Bernard Pullman, *L'atome dans l'histoire de la pensée humaine*. Paris, Arthème Fayard, 1995
- Mary-Jo Nye, *The question of the atom*. Los Angeles, Tomash, 1984
- Gérard Borvon, *Histoire de l'oxygène*. Paris, Vuibert, 2012
- Jean-Michel Maldamé, *Pierre Gassendi, Naissance de l'atomisme* in Jean-Michel Maldamé, *Prêtres et scientifiques*. Desclée de Brouwer 2012, p.
- Bernadette Bensaude-Vincent, *Lavoisier : une révolution scientifique* in Michel Serres, *Éléments d'histoire des sciences*. Paris Bordas 1989, p. 363