

Structure de la matière...

...Une question sans cesse renouvelée à travers l'histoire des sciences

La structure de la matière est une question fondamentale qui agita les savants dès 450 avant J-C. Leucippe et son disciple Démocrite sont les premiers à suggérer l'existence d'atomes¹, entités constitutives élémentaires et insécables, infimes et invisibles à l'œil nu, dont l'assemblage vient à former les différentes substances qui nous entourent. La notion de nature chimique des atomes, bien qu'erronée, est déjà présente : on prête à un type d'atome des qualités essentielles (forme, poids, taille), qui donneront à l'objet formé ses caractéristiques. Ces éléments de pensée sont parvenus jusqu'à nous à travers les écrits d'Épicure (« *Lettre à Hérodote* »), puis de Lucrèce :

De l'atome – « Poursuivons : puisqu'il y a un sommet extrême où aboutit ce corps élémentaire qui déjà lui-même cesse d'être perceptible à nos sens, ce dernier élément est évidemment exempt de parties et atteint au dernier degré de petitesse. [...] »

Les corps premiers sont donc d'une simplicité impénétrable, et forment un ensemble homogène et étroitement cohérent de particules irréductibles ; ce ne sont pas des composés hétérogènes provenant du concours de celle-ci, mais ils se prévalent au contraire d'une simplicité éternelle, dont la nature ne permet pas qu'on puisse encore rien retrancher ni soustraire, les réservant pour être les semences des choses. »

Lucrèce, « *De Natura Rerum* »

Jusqu'au XVIII^e siècle, cette vision atomistique de la matière reste cependant minoritaire devant la pensée d'Aristote (IV^e siècle avant J.C.), selon laquelle toute matière est composée de 4 éléments : l'eau, l'air, la terre et le feu.

Il faut attendre les expériences du chimiste français Antoine de Lavoisier, au XVIII^e siècle, pour trancher le débat sur la nature de la matière. Celui-ci étudie diverses réactions chimiques impliquant le dioxygène² : combustion, formation de la rouille, respirations animale et végétale. Il introduit notamment une méthodologie à base de pesées très précises, et prouve que si la matière change d'état dans une réaction chimique, la masse totale des réactifs et des produits reste identique du début jusqu'à la fin de la réaction. Brûlant du phosphore et du soufre dans l'air, il montra que les produits pèsent plus que les réactifs de départ, la masse gagnée étant perdue par l'air. En outre, Lavoisier clarifie le concept d'un élément comme étant une substance simple ne pouvant être décomposée par aucune méthode connue d'analyse chimique. Au cours d'expériences, il isole et identifie les éléments oxygène, azote, hydrogène, phosphore, mercure, zinc et soufre.

¹ La racine grecque de ce mot, *atomos*, signifie « qu'on ne peut couper, insécable ».

² L'élément oxygène a été nommé ainsi par Lavoisier d'après les racines grecques « oxus » (aigu,acide) et « gennan » (engendrer), après que celui-ci ait démontré son rôle dans la formation de l'acide phosphorique et de l'acide sulfurique.

L'ensemble de ces résultats peut se comprendre si l'on suppose la matière constituée des atomes imaginés par les grecs. La **théorie atomique** fut formalisée par le chimiste et physicien anglais John Dalton dès 1808. Il proposa notamment une liste d'éléments chimiques, caractérisés chacun par une **masse atomique** multiple de la masse atomique de l'hydrogène. Il suggéra également l'existence de molécules, formées par combinaison d'atomes (Figure 1).

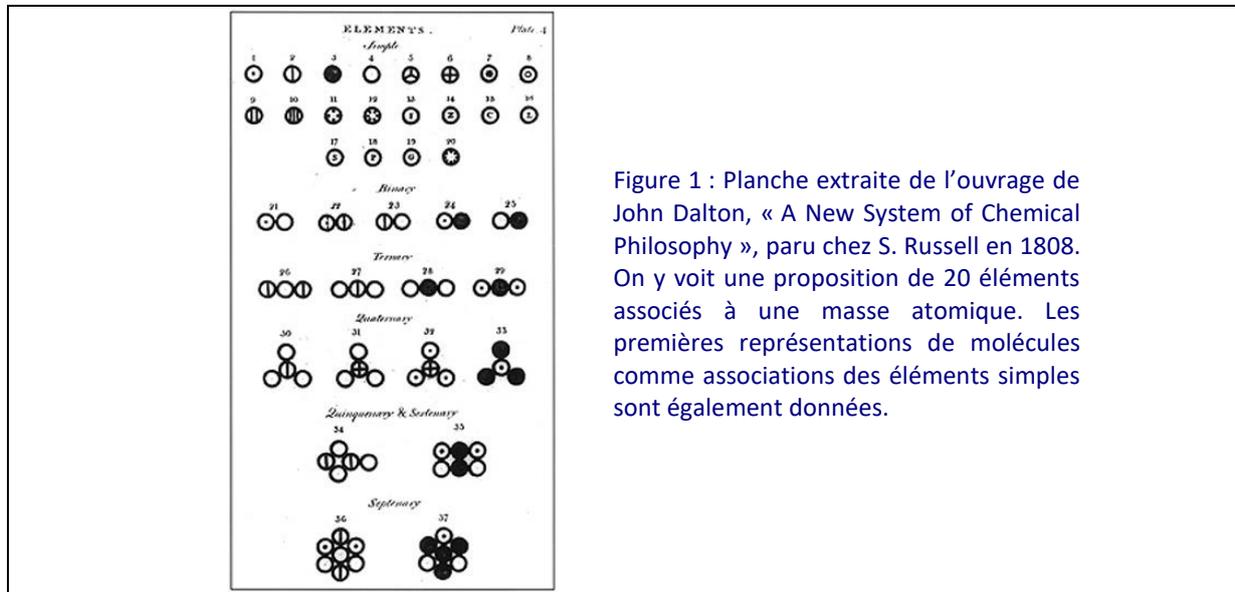


Figure 1 : Plaque extraite de l'ouvrage de John Dalton, « A New System of Chemical Philosophy », paru chez S. Russell en 1808. On y voit une proposition de 20 éléments associés à une masse atomique. Les premières représentations de molécules comme associations des éléments simples sont également données.

L'existence de molécules et plus généralement de solides suppose l'existence de liaisons entre atomes. Les premières indications sur la nature de ces liaisons furent apportées par le physicien britannique Michael Faraday, en 1832. En faisant passer un courant électrique dans une cuve remplie d'eau, il constate que du dihydrogène et du dioxygène se dégagent aux électrodes négative et positive, respectivement. Un courant électrique peut donc séparer l'eau en ses 2 éléments chimiques de base (électrolyse). Lors de ses expériences, Faraday se rend compte que la quantité de gaz produits est directement proportionnelle au courant circulant dans la cuve. Il en déduit que l'électricité doit être, d'une manière ou d'une autre, la force qui lie les atomes entre eux...

L'électron n'est pas encore connu à l'époque de Faraday. Il est découvert en 1897 par l'anglais Joseph Thomson, grâce à l'expérience du tube cathodique³. Peu de temps après, la découverte de la radioactivité et les expériences de Rutherford permettaient d'émettre l'hypothèse que les atomes sont constitués de noyaux chargés positivement (concept de proton) et entourés d'électrons de charge opposée. Dans le même temps, pendant les années 1924-27, le développement de la mécanique quantique permet de décrire de manière précise le comportement des électrons des atomes. Ce n'est qu'en 1932 que le neutron fût découvert, permettant de compléter l'image de l'atome tel que nous le connaissons actuellement.

³ <http://www.cea.fr/multimedia/Pages/videos/culture-scientifique/physique-chimie/decouverte-electron.aspx>

La découverte de la radioactivité au début des années 1900 montre que la désintégration des éléments chimiques est possible et bouleverse la vision de l'atome comme constituant élémentaire de la matière. La physique des particules prend alors peu à peu son essor, poursuivant la recherche des constituants élémentaires de la matière et des interactions assurant leur cohésion. Dans les années 1960, les premiers accélérateurs permettent de mettre en évidence les quarks, constituants des protons et des neutrons. A ce jour, les électrons et les quarks sont considérés comme des particules élémentaires constituant la matière, sans que l'on sache si celles-ci pourraient être composées de particules encore plus petites (Figure 2).

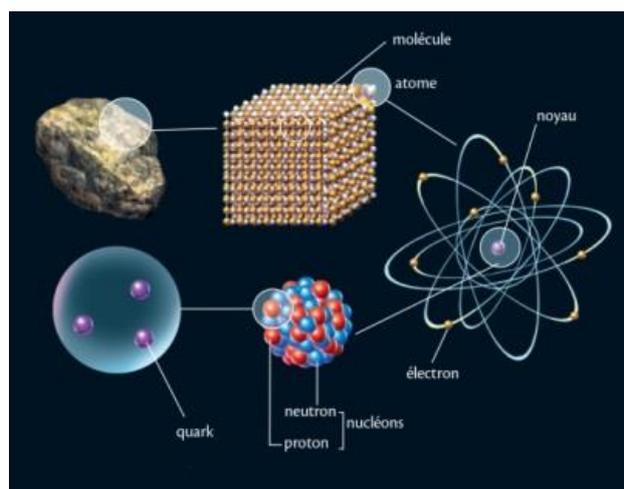


Figure 2 : La matière est composée de molécules regroupant des atomes de différents éléments (hydrogène, carbone, etc.). Les éléments diffèrent par le nombre de protons, de neutrons (nucléons) et d'électrons qui les composent. Les nucléons sont, quant à eux, composés de quarks.

Les protons et les neutrons forment le noyau de l'atome, d'une taille de quelques fm (10^{-15} m). Les électrons se répartissent au sein d'un nuage électronique atteignant quelques Å (10^{-10} m) en taille, définissant également la taille de l'atome. Ainsi un atome est constitué principalement de vide, 5 ordres de grandeur séparant les tailles caractéristiques des électrons, protons et neutrons et l'extension du nuage électronique.

© Dessin Alain Boyer / Larousse

Sans atteindre les confins de l'infiniment petit, la **description de la matière à l'échelle atomique** constitue une discipline à part entière, motivée par la possibilité de comprendre l'**origine des propriétés physiques des matériaux**. En effet, la structure atomique est intimement liée à la nature des liaisons chimiques et à la symétrie du composé, déterminantes pour les propriétés mécaniques, optiques, électriques et magnétiques. Les défauts tels que les impuretés jouent également un grand rôle sur ces propriétés (Figure 3).

Les études expérimentales de structures atomiques ont réellement pris leur essor au début du XX^e siècle, suite à la découverte des rayons X par Wilhelm Röntgen en 1895 (Figure 4(a)). Les rayons X sont un rayonnement électromagnétique d'une longueur d'onde de quelques angströms ($1 \text{ \AA} = 10^{-10}$ m), correspondant aux distances interatomiques typiques rencontrées dans la matière solide ou liquide. En 1912, Max von Laue, Walter Friedrich et Paul Knipping démontrent le phénomène de diffraction des rayons X par un cristal, en complète similitude avec le phénomène de diffraction de la lumière visible par des objets micrométriques (Figure 4(b-c)). L'analyse de la répartition des tâches de diffraction permet de remonter aux distances interatomiques, et ouvre la voie d'une exploration de la matière à l'échelle atomique...

Le présent cours a pour objet la description de la structure atomique de la matière, d'un point de vue à la fois formel et expérimental, ainsi que le lien entre structure atomique et propriétés physiques.

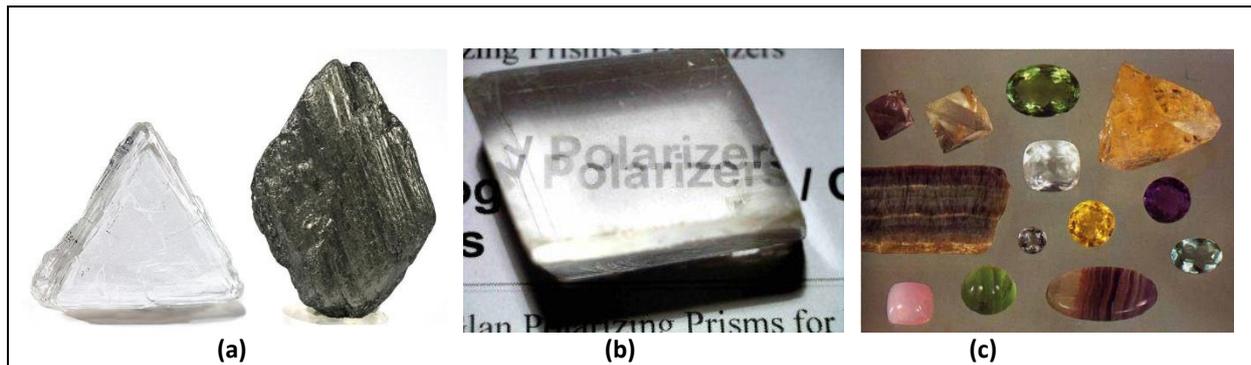


Figure 3 : **(a)** Le diamant et le graphite, deux formes cristallines de l'élément carbone. Le diamant, transparent, isolant, et très dur, doit sa cohésion à des liaisons covalentes entre les carbones. Le graphite, noir, partiellement conducteur, et friable, doit sa cohésion à des liaisons de type covalent et Van Der Waals. Photographies de Rob Lavinsky [iRocks.com / mindat.org].

(b) Phénomène de biréfringence dans un cristal naturel de calcite : le texte apparaît dédoublé car les deux composantes transverses de champ associées à la lumière visible subissent des réfractions d'angles différents. Ce phénomène ne peut être observé que dans des cristaux anisotropes, c'est-à-dire de symétrie non cubique. Photographie : ressources.univ-lemans.fr.

(c) Cristaux de fluorine. La structure atomique de chacun de ces cristaux est identique. Les différences de couleur impressionnantes que l'on observe sont dues à la présence de différents types d'impuretés. Celles-ci se trouvent pourtant à l'état de traces dans le cristal (concentrations inférieures à 0.1% !). Photographie : « Guide des pierres précieuses », par W. Schumann.

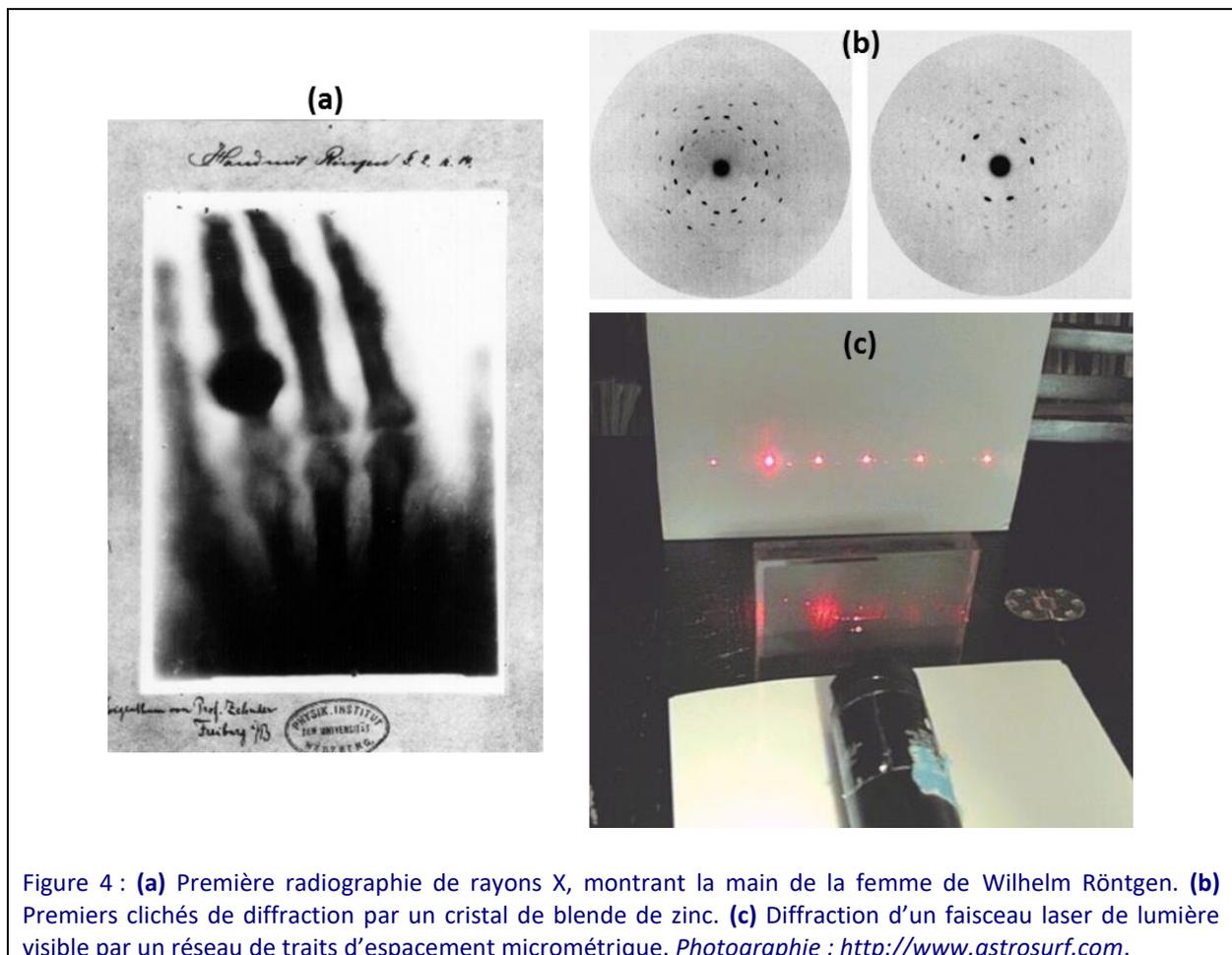


Figure 4 : **(a)** Première radiographie de rayons X, montrant la main de la femme de Wilhelm Röntgen. **(b)** Premiers clichés de diffraction par un cristal de blende de zinc. **(c)** Diffraction d'un faisceau laser de lumière visible par un réseau de traits d'espacement micrométrique. Photographie : <http://www.astrosurf.com>.