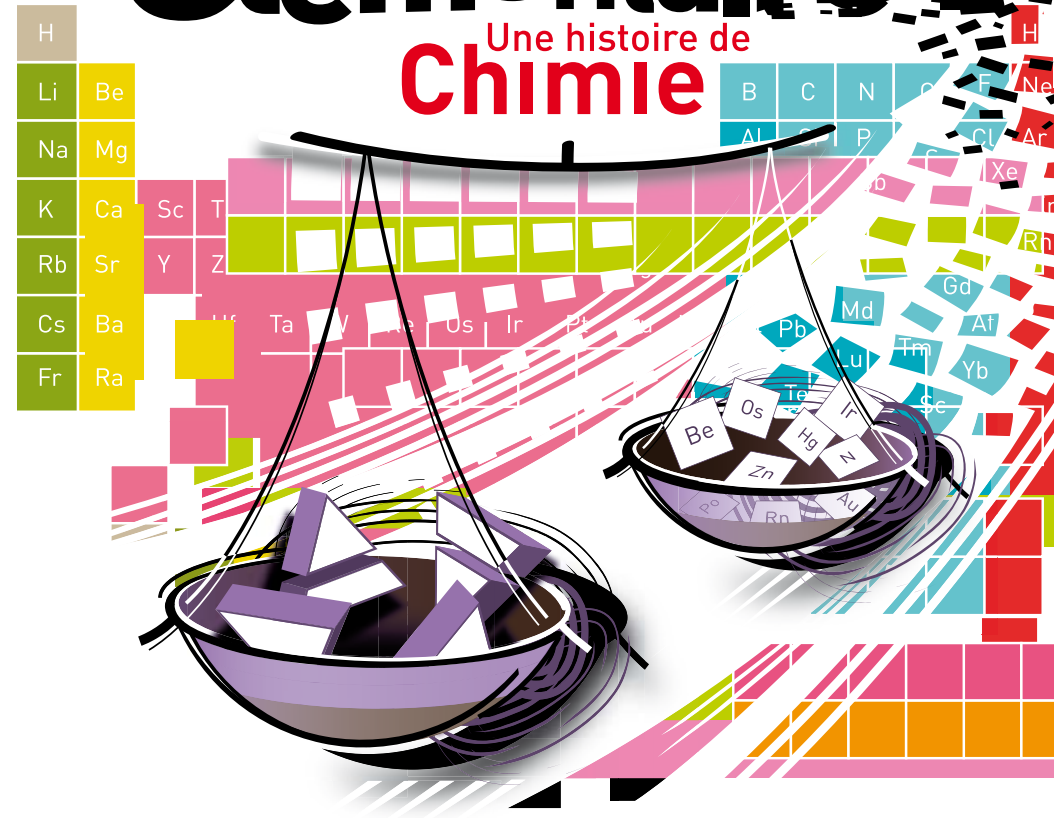


Élémentaire

Une histoire de
Chimie



Le Musée d'histoire des sciences a choisi, pour célébrer l'Année internationale de la chimie, de raconter comment, en l'espace de quelques décennies, on est passé des quatre éléments antiques à la centaine d'éléments naturels du tableau périodique.

Elémentaire ! Une histoire de chimie est une exposition originale du Musée d'histoire des sciences de Genève.

Présentée du 16 février 2011 au 9 janvier 2012, elle s'accompagne d'un dossier pédagogique téléchargeable sur le site du musée
www.ville-ge.ch/mhs

© Musée d'histoire des sciences, Genève 2011

De quoi est fait notre monde ? Comment expliquer sa diversité ? Ces questions traversent toute l'histoire de l'humanité. Les Grecs de l'Antiquité y ont apporté leurs réponses, tout comme le font les chercheurs contemporains.

Les propositions d'Empédocle et d'Aristote convainquent philosophes et savants pendant plus de 2000 ans : le monde pourrait se comprendre à partir de quatre éléments fondamentaux, le feu, l'air, l'eau et la terre. De leur interaction naîtraient les différentes matières connues. Les alchimistes du Moyen Age et de la Renaissance souscrivent à ce modèle tout en développant gestes techniques et pratiques de laboratoire. Le modèle des quatre éléments tient jusqu'à la fin du 18^e siècle - avec des aménagements et des compléments théoriques comme le phlogistique - et permet l'essor progressif d'une nouvelle science : la chimie.

C'est la découverte de l'oxygène et surtout la décomposition de l'eau par Lavoisier vers 1785 qui marque le tournant décisif dans l'histoire de cette science. Il apporte la preuve qu'un des éléments antiques, l'eau, est en fait composé de deux gaz. Mais alors, de quoi se compose donc la matière ? Dalton propose son modèle atomique, reprenant sous une autre forme la thèse des particules élémentaires du Grec Démocrite. En parallèle, différents savants se mettent à établir des listes d'éléments et tentent de les arranger selon un ordre logique. C'est Mendeleïev, dès 1869, qui propose un système auquel chacun peut adhérer : le tableau périodique des éléments. Ceux-ci sont arrangés non seulement en fonction de leur poids atomique, mais aussi de propriétés que certains éléments partagent avec d'autres. Cette classification laisse des vides que les chercheurs s'attacheront à remplir. On découvre les éléments manquants soit par spectrométrie, électrolyse ou par des mesures précises. L'enjeu de la détermination des poids atomiques est fondamental, elle permet notamment de comprendre les assemblages d'atomes en molécules. Galissard de Marignac est l'un de ceux qui se lance dans ce grand chantier. Il détermine le poids atomique de 28 éléments et en découvre même deux nouveaux.

Le feu, l'air, l'eau et la terre

Jusqu'au 17^e siècle, notre conception de la matière est fondée sur celle des Grecs de l'Antiquité. Selon Empédocle, (490-435 av. J.-C.), toute chose ou tout corps sur la Terre est formé à partir de quatre éléments primordiaux : le feu, l'air, l'eau et la terre qui s'attirent ou se repoussent sous l'action de forces cosmiques opposées, l'amour et la haine.

Aristote (384-323 av. J.-C.) reprend à son compte cette théorie en associant à chaque élément deux propriétés choisies parmi quatre qualités : le chaud, le froid, le sec et l'humide. Ainsi, le feu est défini par le couple chaud et sec, l'air par le chaud et l'humide, l'eau par le froid et l'humide et la terre par le froid et le sec. Tous les éléments partagent une qualité commune avec deux autres. Ils peuvent donc se transformer de l'un en l'autre si l'on remplace une qualité par son contraire. Cette théorie suffit alors pour expliquer certains phénomènes, comme la fusion d'un métal, la combustion ou l'évaporation.

Les principes des alchimistes

Inspirés par la théorie des 4 éléments d'Aristote, les alchimistes l'adaptent à leur pratique. Dans leur doctrine, la matière (surtout les minerais) est constituée de deux principes constitutifs fondamentaux : le principe du Mercure, froid, humide, féminin, et celui du Soufre, chaud, sec, et masculin. Dès le 15^e siècle, un troisième principe est introduit, le Sel, pour faciliter l'union des deux premiers.

Dans la vision alchimique, les sept métaux connus alors (fer, cuivre, plomb, étain, mercure, argent et or) se forment au cœur de la Terre sous l'influence des sept planètes, par la combustion des principes Soufre et Mercure qui se mélangent alors dans des proportions variables. En bas de la hiérarchie des métaux, on trouve le fer, riche en « principe Soufre », qui présente une forte tendance à brûler. L'or au contraire, riche en « principe Mercure », est considéré comme le métal parfait, car il ne se consume pas. Tout l'art de transmutation consiste à transformer un métal vil en métal noble (or et argent), en agissant sur les proportions relatives des deux principes.

La naissance de la chimie scientifique

Le 17^e siècle voit la lente émergence d'une chimie rationnelle et pragmatique qui tente de prendre ses distances avec l'hermétisme de l'alchimie. Les premiers chimistes professionnels sont souvent des apothicaires. Pour préserver leur corporation des charlatans, ils introduisent des examens théoriques et pratiques. Ils rédigent les premiers traités de chimie présentant de manière claire et détaillée des recettes, des remèdes et des techniques de laboratoire.

Ces ouvrages sont accompagnés de diverses explications théoriques qui ne sont pas encore très convaincantes. Dans la conception de la matière, certains admettent l'existence de trois principes premiers – le mercure, le soufre et le sel – dont les autres dépendent, alors que d'autres prônent l'existence d'un esprit universel qui se transforme en différents principes selon la matière où il est reçu.

Selon qu'elle soit inspirée par Newton ou Descartes, la chimie du 17^e siècle adopte une vision corpusculaire fondée sur les forces d'attraction ou de répulsion, ou une conception plutôt mécaniste basée sur la forme et le mouvement des différentes particules qui interagissent les unes avec les autres.

Le feu du phlogistique

Au 17^e siècle, l'élément terre ne cesse de gagner en complexité alors que le feu devient le fondement de la première véritable théorie chimique moderne : le phlogistique (du grec phlogistos, inflammable)

A l'origine, dans les travaux du médecin et chimiste allemand Joachim Becher (1635-1682), l'eau et la terre demeurent des éléments fondamentaux qui constituent tous les corps. Becher distingue cependant trois types de terre : la terre vitrifiable qui forme le cristal de roche, la terre mercurielle qui entre dans la composition des métaux et la terre inflammable à base de soufre responsable de la combustion.

Cette terre inflammable sera le phlogiston ou « principe igné » dont le chimiste allemand Georg Stahl (1660-1734) se sert pour expliquer, entre autres, la combustion et la calcination. Quand un corps brûle, il perd ce principe qui se dégage sous la forme de flamme, devenant ainsi un « corps déphlogistiqué », non combustible. Le fer devient rouille et le cuivre vert-de-gris lorsqu'ils laissent progressivement échapper leur phlogiston. Le charbon, que les ouvriers métallurgistes introduisent dans le fourneau lors d'une réduction (purification d'un métal à partir de son minerai), fournit le phlogiston à la « chaux métallique » (oxyde de métal) pour qu'elle redevienne un métal pur. Qualifiée de sublime, la théorie du phlogistique de Stahl séduit très vite l'ensemble des chimistes européens. Elle contribue aussi à stimuler la recherche dans un nouveau domaine de la chimie : la chimie des airs ou chimie pneumatique.

Drôles d'airs

Après avoir étudié les effets de la raréfaction de l'air sur des êtres vivants au moyen de machines pneumatiques et de cloches en verre, les savants du 18^e siècle se mettent sérieusement à étudier sa composition chimique. Ils développent de nouveaux instruments comme la cuve pneumatique ou l'eudiomètre pour recueillir les différents gaz (esprits) qui s'échappent lors de leurs expériences. Ils constatent très vite que l'air semble en fait constitué de plusieurs airs différents.

En versant de l'acide sur du calcaire, on provoque une effervescence qui libère un curieux gaz, différent de l'air ambiant, qui n'entretient pas la vie et éteint les bougies, et qui trouble l'eau de chaux. Cet air fixe, qui semble être le même que celui produit par la respiration ou la combustion, est aussi appelé air phlogistique (car saturé en phlogistique libéré par la combustion du charbon...). Il correspond à ce qu'on appellera plus tard le gaz carbonique.

Autre curiosité : l'ajout d'acide sur des métaux provoque la libération d'un autre type de gaz, l'air inflammable, très léger, susceptible de s'enflammer à la moindre étincelle, équivalent de notre hydrogène (H₂).

Enfin l'Anglais Joseph Priestley (1733-1804) et le Suédois Carl Wilhelm Scheele (1742-1786) isolent un curieux gaz libéré par les plantes lorsqu'elles croissent, et qui, au contraire de l'air fixe, entretient la vie et active les combustions. Ce *Feuerluft* ou air vital est aussi décrit comme air déphlogistique. Il faudra attendre Lavoisier pour le nommer oxygène (O₂).

L'air et l'eau ne sont plus des éléments

« Car rien ne crée, ni dans les opérations de l'art, ni dans celles de la nature, et l'on peut poser en principe que dans toute opération, il y a une égale quantité de matière avant et après l'opération ; que la qualité et la quantité des principes est la même et qu'il n'y a que des changements, des modifications ».

Extraits de son *Traité élémentaire de chimie*, ces propos du Français Antoine Lavoisier (1743 -1794) résument bien le travail de ce chimiste hors pair. Adeptes d'une chimie quantitative, plutôt que qualitative, il recourt systématiquement à la balance pour peser les réactifs et les produits d'une réaction.

Dans un premier temps, il démontre que les métaux soumis à la combustion gagnent du poids, et que ce gain correspond au poids de l'air perdu lors de la réaction. En affinant ses recherches, il découvre que cette fraction d'air perdu est constituée uniquement d'air vital (qu'il nommera plus tard oxygène, et qui est en réalité la molécule de dioxygène) et que c'est elle seule qui est responsable de la combustion. Une découverte qui marque la fin du phlogistique !

Les travaux de Lavoisier remettent aussi sérieusement en cause l'existence des quatre éléments primordiaux d'Aristote. En 1785, au cours d'une spectaculaire expérience publique, le savant réalise la décomposition de l'eau en hydrogène (H₂) et en oxygène (O₂), suivi de sa synthèse. Après avoir mis à mal l'air et le feu, il condamne ainsi définitivement l'eau !

Lavoisier définit une nouvelle nomenclature chimique sur laquelle il se fonde pour établir un tableau des substances simples, recensant 33 substances alors indécomposables (dont le calorique et la lumière) équivalentes de nos corps simples actuels. Il juge « vain et métaphysique » de vouloir rechercher les éléments constituants ultimes de la matière.

Une avalanche de nouveaux éléments chimiques

L'invention de la pile électrique par l'Italien Alessandro Volta (1745-1827) en 1800 aboutit à la mise au point d'un nouveau procédé d'analyse, l'électrolyse. Elle permet de séparer des corps ou des substances qui ne pouvaient être dissociées jusqu'ici par action chimique ou par la chaleur. L'Anglais Humphrey Davy (1778-1829) isole ainsi le sodium, le potassium, le baryum, le strontium, le calcium et le magnésium. De son côté, le Suédois Jacob Berzelius (1779-1848) et ses élèves identifient le cérium, le sélénium, le silicium, le zirconium, le thorium, le lithium et le vanadium. En 1834, on recense ainsi 54 éléments.

Dans le même temps de nouvelles lois sont énoncées sur la manière dont se combinent entre eux ces éléments et dans quelles proportions ils s'assemblent pour former des corps composés (on ne parlait pas encore de molécules). En 1804, l'Anglais John Dalton (1766-1844) formule sa théorie atomique stipulant que la matière est formée de particules insécables, les atomes qui diffèrent en poids (la masse atomique) d'un élément à l'autre. La théorie atomique revient ainsi en force en chimie 2000 ans après sa première formulation par le philosophe et savant grec Démocrite (460-370 av. J.-C.).

Quelques années plus tard, Jacob Berzelius, l'un des pères de la chimie moderne, reprend la théorie atomique en procédant à une nouvelle détermination rigoureuse des poids atomiques de tous les éléments connus à ce jour. Il sera aidé dans cette tâche fastidieuse par plusieurs chimistes européens, dont le Genevois Jean-Charles Galissard de Marignac (1817-1894) qui, entre 1842 et 1883, redéfinira avec grande précision la masse atomique de 28 éléments.

Le tableau périodique des éléments

Dès 1860, l'invention du spectroscope contribue encore à accélérer l'identification de nouveaux éléments chimiques : césium, rubidium, thallium, indium, etc. Les premières classifications sont établies sur la base des poids atomiques de ces éléments. Les chimistes commencent alors à deviner une relation entre les poids atomiques et les propriétés chimiques des éléments, autrement dit leur capacité à réagir avec les autres.

En 1869, le Russe Dmitri Mendeleïev (1834-1907) observe qu'en classant les 63 éléments connus selon leur poids atomique, ceux-ci montrent des propriétés chimiques qui se répètent à intervalles réguliers. Le tableau périodique des éléments est né ! Dans sa classification, Mendeleïev laisse volontairement des blancs pour des éléments dont il pressent l'existence, mais qui ne seront découverts que quelques années plus tard comme le gallium, le scandium et le germanium. Il ne prévoit cependant pas la découverte, entre 1894 et 1898, d'une série d'éléments totalement nouveaux, les gaz rares, qui seront rajoutés au tableau périodique dans une colonne séparée.

La théorie de la périodicité des propriétés des éléments énoncée par Mendeleïev constitue encore la base de l'actuel tableau de classification qui compte 92 éléments que l'on peut trouver dans la nature, et 118 éléments chimiques si l'on y associe ceux produits artificiellement en laboratoire.

Périodicité des éléments et électrons

Le tableau de Mendeleïev met clairement en évidence une périodicité dans le classement des éléments. Lorsqu'ils sont arrangés en ligne par ordre de poids atomique croissant, certains d'entre eux présentent, à intervalles réguliers, des propriétés similaires. Mendeleïev, qui les dispose en colonnes dans son tableau, ignorait cependant les raisons de ces répétitions.

Il faudra attendre les découvertes de l'électron en 1897 par l'Anglais John Thomson (1856-1940), du noyau atomique en 1911 par le Néo-zélandais Ernest Rutherford (1871-1937) et surtout la formulation du modèle atomique par le physicien danois Niels Bohr (1885-1962) en 1913 pour trouver enfin une explication de cette périodicité. Il décrit l'atome comme une sorte de mini système planétaire presque entièrement formé de vide avec un noyau central positif (les neutrons ne seront découverts que dans les années 1930) autour duquel gravitent des électrons. Suivant leur nombre, les électrons occupent une ou plusieurs orbites (considérées comme circulaires) autour du noyau correspondant chacune à un niveau d'énergie bien défini. Les propriétés chimiques des atomes découlent en grande partie de la manière dont les électrons se répartissent dans ces orbites et en particulier dans celles qui se trouvent à la périphérie. Ce sont en effet les électrons externes qui sont responsables de la réactivité chimique des atomes, c'est-à-dire de leur capacité de se lier à d'autres atomes.

Les électrons peuvent passer d'une couche à une autre, d'énergie plus élevée, si on les excite en leur fournissant la quantité d'énergie nécessaire. Ils restituent spontanément ce paquet d'énergie sous la forme d'un photon (grain de lumière) en revenant à leur état initial. Ce phénomène est à l'origine des spectres d'émission ou d'absorption caractérisant chaque élément, qui sont étudiés en spectrographie, une des principales méthodes d'analyse chimique.

Le modèle de Niels Bohr jette les bases de la mécanique quantique, une nouvelle branche de la physique qui tente de décrire les phénomènes fondamentaux survenant au niveau atomique

et subatomique, et où les électrons ne sont plus décrits comme des corps ponctuels gravitant autour d'orbites bien définies, mais comme des sortes d'ondes occupant simultanément tout un volume (ou orbitale).

La découverte de la structure atomique va aboutir à une nouvelle classification des éléments chimiques, encore utilisée aujourd'hui, fondée non plus sur leur masse atomique mais sur leur numéro atomique (nombre de protons). Ce nouvel agencement (qui coïncide en grande partie avec celui de Mendeleïev) permet aussi de résoudre quelques anomalies liées au rangement originel par masse atomique.

Tableau périodique et radioactivité

Le phénomène naturel de la radioactivité a été découvert en 1896 par le physicien français Henri Becquerel (1852-1908), puis par Pierre (1859-1906) et Marie (1867-1934) Curie en étudiant du minerai d'uranium. Ils se partageront le prix Nobel en 1903 pour leurs travaux. Marie Curie recevra un second prix Nobel en 1911 pour avoir identifié deux nouveaux éléments radioactifs naturels, le polonium et le radium. L'année 2011, consacrée Année internationale de la chimie, est aussi le centième anniversaire de l'attribution de ce second prix Nobel de chimie à Marie Curie !

La radioactivité consiste en la transformation d'un élément instable en un autre plus léger et plus stable. Au cours de ce processus, le noyau atomique se désintègre en perdant une partie de sa masse qui est éjectée sous la forme de particules et de différents types de rayonnement potentiellement dangereux. Depuis les travaux des Curie, les physiciens ont observé que plusieurs éléments du tableau périodique possèdent des isotopes (atomes qui ont le même nombre de protons, mais un nombre de neutrons différent) naturellement radioactifs dont les plus connus sont le tritium (^3H) le carbone 14 (^{14}C) ou le potassium 40 (^{40}K).

En 1930, les Français Frédéric (1900-1958) et Irène (1897-1956, la fille de Marie et Pierre Curie) Joliot-Curie parviennent à fabriquer en laboratoire les premiers éléments radioactifs artificiels. Ces travaux, récompensés par un prix Nobel en 1935, ouvrent la voie à la synthèse de nombreux éléments radioactifs qui viendront s'ajouter aux éléments chimiques naturels du tableau périodique. En règle générale, tous les éléments qui présentent un numéro atomique (nombre de protons dans le noyau) supérieur à 84 sont radioactifs. La majorité d'entre eux sont de purs produits de laboratoire sans aucune application particulière, et dont le temps de vie est tellement court que leurs caractéristiques chimiques nous restent inconnues. Certains sont utilisés dans l'industrie ou dans l'imagerie médicale comme traceurs ou marqueurs. A ce jour, le tableau périodique comprend 118 éléments ; les 112 premiers portent un nom et un symbole chimique international officiels ; les six derniers sont décrits par un symbole temporaire.

Jean-Charles Galissard de Marignac (1817-1894)

Discret et modeste, Charles Marignac (comme il aimait à signer) a été un acteur très important de la connaissance des éléments chimiques.

Après de brillantes études à Genève et à Paris, il voyage en Allemagne et en Scandinavie où il rencontre le célèbre chimiste suédois Berzelius (1779-1848). Nommé professeur de chimie en 1841, puis également de minéralogie en 1845, à l'Académie de Genève, il entreprend de minutieux travaux de détermination de poids atomique de quelques éléments clef (le chlore, l'argent et le potassium). L'enjeu de ses recherches est de comprendre leur principe d'organisation, en vérifiant si leur poids correspond, ou non, à des multiples de celui de l'hydrogène (hypothèse de Prout). La très grande précision de ses résultats force l'admiration de Berzelius qui pousse Marignac à poursuivre dans cette voie. Pesant, repesant, répétant ses expériences, il vérifiera ainsi la masse atomique de 28 éléments du tableau périodique !

Arrivé à la retraite, il poursuit ses travaux dans le laboratoire de son appartement et c'est là qu'il isole et identifie deux nouveaux éléments issus du groupe des terres rares: l'ytterbium en 1878, puis un autre élément en 1880 qui sera baptisé gadolinium quelques années plus tard, en l'honneur du chimiste finlandais Johan Gadolin (1760-1852) qui avait découvert pour la première fois, en 1794, un élément de la famille des terres rares, l'yttrium.

Les travaux de Marignac lui vaudront une reconnaissance internationale et de prestigieuses distinctions, dont un doctorat *honoris causa* de l'Université d'Heidelberg, la médaille Davy de la Royal Society de Londres et la médaille de l'Ordre pour le mérite allemand.