

LE TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES, RIGUEUR... ET POÉSIE

Séance ordinaire du 3 février 2023
Communication de M. Patrice Rubini

L'élaboration de l'organisation des éléments chimiques menant au tableau périodique, dit aussi tableau de Mendeleïev, constitue une avancée majeure en chimie et en sciences en général. C'est un outil indispensable au chimiste, au physicien, au géologue et il peut être utile à tout un chacun pour pouvoir mieux appréhender et comprendre les difficultés liées au traitement des sujets en rapport avec l'énergie (hydrogène, batteries au lithium...), les matières premières (terres rares, métaux lourds...), souvent abordés dans l'espace médiatique avec beaucoup d'imprécisions et de confusion.

Le long chemin qui mène à la définition précise de l'élément chimique parcourt l'histoire de l'humanité et, bien sûr, l'histoire de la chimie elle-même, qui est une science relativement ré-

cente puisqu'on peut en dater les balbutiements à la publication en 1664 de *The Sceptical Chymist* par l'Irlandais Robert Boyle et les consolidations des premières bases vers la fin du XVIII^e siècle grâce à des savants comme Lavoisier.

Les éléments chimiques ont une histoire qui se confond avec celle de l'univers, puisqu'ils dérivent tous de l'hydrogène primordial qui est apparu dans les premiers instants après le Big Bang, lui-même engendré par des particules élémentaires sur lesquelles nous ne reviendrons pas dans cet exposé. Tous les éléments chimiques présents dans la nature ont donc été créés par nucléosynthèse à partir de l'élément le plus simple qui existe, l'hydrogène. Mais, avant d'aboutir à la conception de l'élaboration de la matière à partir de la combi-

raison variée des éléments chimiques, la cosmogonie et la cosmologie évoluèrent dans les méandres philosophiques et religieux où la science physique et chimique trouva très lentement sa place. Que de chemin parcouru depuis l'Océan cosmique de Thalès de Milet vers 600 av. J.-C., où l'eau est l'élément primordial de l'univers, ou bien l'infini d'Anaximandre (disciple de Thalès), matière indéterminée, qui contient en lui-même les contraires (le chaud et le froid, le sec et l'humide), et aussi les homéoméries (germes) d'Anaxagore, qui considère la matière constituée d'un nombre infini d'éléments infiniment divisibles dont le mélange donne naissance aux divers corps. « Tout est dans tout », affirmait-il, ce qui constitue peut-être un énoncé primitif du principe de la conservation de la matière. Sur ce parcours apparaissent les couples contrariés d'Héraclite, où des échanges compensés donnent lieu à un équilibre entre le Feu, l'Être primordial, la Mer, la Terre et l'Air, sans oublier la philosophie chinoise, qui retient cinq éléments : Eau, Feu, Bois, Métal et Terre. C'est Empédocle qui, au ^v^e siècle av. J.-C., sera le fondateur de la théorie des quatre éléments : l'eau, l'air, le feu et la terre, dont la combinaison crée toute chose et où attraction et répulsion s'opposent continuellement.

Tout cela fut repris par les pythagoriciens (580-495 av. J.-C.) et Platon (428-348 av. J.-C.) puis par Aristote (384-322 av. J.-C.). Les alchimistes, notamment ceux d'Alexandrie, suivirent. Il faut mentionner néanmoins Démocrite (vers 460-370 av. J.-C.), repris par Lucrèce (98-55 av. J.-C.) dans son célèbre *De rerum natura*, qui pressentit que la matière était constituée de particules in-

sécables (*átomos* en grec) et éternelles, mais cette idée fut oubliée pendant des siècles. L'autorité d'Aristote s'imposa.

Les théories de Paracelse (1493-1541) présentent une rupture dans l'évolution de la connaissance de la matière, particulièrement en insistant sur l'idée de la connaissance expérimentale de la nature. Les quatre éléments fondamentaux ne sont plus des corps simples, et il fait intervenir les trois principes : sulfureux, salin et mercuriel, qui font partie de tous les corps. La Terre, l'Air, l'Eau et le Feu ne sont plus que des réceptacles où les choses sont créées. Il introduit aussi l'idée de l'élément prédestiné ou cinquième essence (*quinta essentia*) qui privilégie, dans chaque objet, un des éléments constitutifs au pouvoir supérieur aux autres. À tout cela sont liées les notions d'énergies « spirituelles », des forces analogues à celles des cellules germinales qui donnent leurs caractéristiques aux éléments. Il rejoint en cela les théories des « semences », qui expliquaient l'origine des métaux.

Les alchimistes travaillent à fabriquer la pierre philosophale et à transmuter des métaux vulgaires en or. Les transformations matérielles des éléments sont liées à des démarches spirituelles. Si la démarche est vouée à l'échec, elle laissera des traces positives par la mise au point d'ustensiles et de pratiques en chimie expérimentale. Nous sommes encore loin des théories modernes rationnelles échafaudées à partir d'observations rigoureuses et d'analyses de plus en plus perfectionnées. Il faut souligner que ce sont les déterminations expérimentales de plus en plus précises qui permirent d'aboutir à la notion moderne d'élément,

en ne se basant plus seulement sur les propriétés, l'aspect ou l'impression que donnaient les éléments comme l'humide, le sec, le froid, le chaud... L'aspect quantitatif, la mesure rigoureuse, l'analyse précise s'imposèrent. C'est alors que le brouillard qui cachait la notion d'élément chimique se dissipe lentement et que la mise en place du tableau qui les rassemble et les classe s'élabore, aboutissant à une construction périodique que nous expliciterons plus tard. Ce tableau est loin de n'être qu'une simple classification, car il se révèle un outil indispensable à la compréhension du monde. Tout ce qui constitue aussi bien la matière inerte que celle qui construit le vivant est là sous nos yeux, inexorable !

Nous verrons qu'on peut y lire les difficultés de séparation de certains éléments quand ils sont mêlés à d'autres dont les propriétés chimiques sont voisines, par exemple quand ils appartiennent à des groupes identiques caractérisés par des structures électroniques de même nature (alcalins...) ou à certaines périodes (terres rares). Il permet également d'expliquer et de prévoir l'évolution de certaines propriétés physiques (rayon atomique, énergie d'ionisation...). C'est là que le caractère périodique du tableau prend toute son importance.

Au cours de cet exposé, nous reviendrons sur l'histoire de la construction du tableau périodique, appelé aussi tableau de Mendeleïev. Ce savant russe est à l'origine de sa présentation moderne. Nous aurons rappelé précédemment ce qu'est un élément chimique dans sa définition actuelle pour mieux comprendre les difficultés et les méandres de la démarche scientifique qui ont conduit à l'élabora-

tion du tableau. Nous ne ferons qu'effleurer la mécanique quantique qui permet la constitution rigoureuse du tableau périodique à partir des quatre nombres quantiques liés à l'énergie et au mouvement des électrons dans l'atome. Il est difficile en effet, dans le cadre restreint de cet exposé, de proposer un développement de cette théorie, même simplifié, tant l'association du qualitatif simple à cette partie de la physique est un oxymore qui frise l'aporie. Nous en exploiterons seulement les conséquences qui permettent de mettre en avant les notions de couches électroniques et d'électrons de valence¹. La lecture du tableau périodique par groupes, périodes et familles est alors possible et permet son utilisation pour comprendre la chimie des éléments, ce que nous illustrerons par quelques exemples qui facilitent la compréhension des difficultés rencontrées dans les processus d'élaboration de matériaux ou de production d'énergie (lithium, terres rares...).

Qu'est-ce qu'un élément chimique ?

Un atome est constitué de protons, chargés positivement, de neutrons, de charge nulle, et d'électrons, porteurs d'une charge négative. Ces derniers ont une masse environ 1800 fois plus faible que celle des protons et neutrons, qui constituent le noyau et sont de masses comparables. L'atome est neutre électriquement. Il comporte autant de protons que d'électrons, mais il peut gagner ou perdre des électrons et devient alors un

1. Les électrons de valence sont ceux qui, situés dans la couche externe d'un atome, peuvent participer à la formation d'une liaison chimique si cette couche extérieure n'est pas totalement remplie.

ion. Le nombre de protons caractérise un élément. Le plus léger d'entre eux est l'hydrogène, avec un proton et un électron. On le symbolise par H. S'il perd son électron il devient l'ion H^+ , qui est responsable de l'acidité en solution aqueuse et dont la concentration est donnée par le pH. Si le noyau possède deux protons, on a alors affaire à l'hélium. S'il en a trois, c'est le lithium, etc. Le nombre de protons équivaut au numéro atomique Z et caractérise les différents éléments. Ainsi, on a $Z=1$ pour H, $Z=2$ pour l'hélium, $Z=3$ pour le lithium, $Z=6$ pour le carbone, $Z=8$ pour l'oxygène, $Z=26$ pour le fer, pour ne citer que quelques exemples. Z est aussi le nombre d'électrons que compte l'atome de l'élément.

Des neutrons viennent s'adjoindre aux protons du noyau et, pour un même élément, le nombre de neutrons peut être variable : on a alors affaire à des isotopes. Le nombre total de protons et de neutrons définit le nombre de masse A . Ainsi, pour l'hydrogène $Z=1$, trois isotopes naturels existent : le protium (un seul proton), le deutérium (un proton et un neutron), le tritium (un proton et deux neutrons). Certains isotopes sont radioactifs et se décomposent spontanément en engendrant d'autres éléments. Le deutérium est stable, alors que le tritium est radioactif.

Un atome tient ensemble grâce à deux grands types de force : la force électromagnétique, qui fait interagir les électrons négatifs avec les protons positifs, et l'interaction forte qui lie les protons et les neutrons dans le noyau, surpassant l'interaction répulsive des charges positives des protons. La masse de l'atome est concentrée dans le noyau, dont la

taille est de l'ordre de 10^{-14} m (cent mille milliardièmes de mètre), alors que la taille d'un atome avoisine les 10^{-10} m (dix milliardièmes de mètre).

Pour former les éléments, on « empile » les protons (et les neutrons) sachant que, et on doit toujours garder cela en tête, c'est le nombre de protons (Z) qui caractérise l'élément. Cent dix-huit éléments chimiques ont été répertoriés jusqu'alors, dont 94 existent naturellement, parfois à l'état de traces. Comment les observe-t-on ? Ce n'est pas aussi évident que nous pourrions le penser, car les éléments peuvent se combiner entre eux pour donner des corps simples ou avec d'autres éléments pour former des corps composés. On peut trouver des éléments à l'état natif dans la nature comme l'or, le carbone (sous forme de diamant), le soufre... On les trouve parfois sous forme de corps simples, c'est-à-dire combinés avec eux-mêmes, comme l'oxygène et l'azote, que l'on respire sous la forme de molécules composées de deux atomes d'oxygène et d'azote (O_2 et N_2).

La plupart des éléments ne sont obtenus purs qu'après avoir été extraits de corps composés, tels que des oxydes (association avec l'oxygène) ou des halogénures, c'est-à-dire combinés au chlore, brome... Un même élément peut se présenter sous des formes très différentes ! Ainsi, le graphite et le diamant sont deux variétés du carbone. Il s'agit, dans les deux cas, des mêmes atomes de carbone, mais leurs types d'empilement donnent lieu à des aspects macroscopiques qui n'ont rien à voir. Pour l'anecdote, il faut savoir que c'est le graphite qui est le plus stable et que tout diamant devrait se transformer en charbon, mais la vitesse

de transformation est infiniment lente. C'est la raison pour laquelle on trouve des diamants dans la couche terrestre.

Il a donc bien fallu trouver un nom à tous ces éléments et on leur a très vite attribué des symboles. Beaucoup de noms proviennent du latin ou du grec. Certains dérivent de leurs propriétés :

hydrogène	« qui engendre l'eau » en grec
oxygène	« qui engendre les acides » (<i>oxus</i> en grec signifie « pointu »)
azote	« qui ne permet pas la vie » en grec
phosphore	« qui porte la lumière » en grec (<i>phos</i> , « lumière » ; <i>phorein</i> , « porter »)
antimoine	« qui ne se trouve pas seul » (le symbole vient du latin <i>stibium</i> , dérivé lui-même de l'arabe)

D'autres sont liés à leur aspect...

lithium	du grec <i>lithos</i> , « pierre »
chlore	du grec <i>chloros</i> , « vert »
brome	du grec <i>bromos</i> , « puant »
iode	du grec <i>iodes</i> , « violet »

... ou à leurs propriétés physiques :

rubidium	du latin <i>rubidus</i> , « rouge » (à cause de son spectre atomique)
baryum	du grec <i>barús</i> , « lourd » (conséquence de sa densité élevée)

Quelques noms d'éléments sont liés à leur découverte :

hélium	du grec <i>hélios</i> , « soleil »
néon	du grec <i>néos</i> , « nouveau »
krypton	du grec <i>kryptos</i> , « caché »
argon	du grec <i>argós</i> , « inactif »
uranium	référence à la planète Uranus, découverte huit ans plus tôt
cérium	référence à l'astéroïde Cérés, découvert deux jours avant
niobium	référence à Niobé, fille de Tantale, car le niobium et le tantale ont des propriétés voisines
molybdène	du grec <i>molubdos</i> , « plomb », car longtemps confondu avec lui

Leurs noms proviennent parfois de l'origine géographique de leur lieu de découverte ou pour mettre en valeur le pays de l'inventeur :

lutétium	hommage à la ville de Paris, <i>Lutetia</i> en latin
polonium	hommage aux origines polonaises de Marie Curie
hafnium	de <i>Hafnia</i> , nom latin de Copenhague
cuiivre	de <i>Kýpros</i> , nom grec de Chypre
berkélium	de Berkeley, campus universitaire de Californie

germanium	hommage à l'Allemagne, pays de son découvreur
yttrium, ytterbium et terbium	du village d'Ytterby, en Suède, où l'on trouve le minerai qui contient ces trois éléments
strontium	de Strontian, en Écosse
ruthenium	de <i>Ruthenia</i> , nom latin de la Russie

On trouve aussi des noms de savants :

fermium	hommage au physicien italien Enrico Fermi
einsteinium	hommage à Albert Einstein
gallium	du latin <i>gallus</i> , « coq », allusion au nom de son découvreur, Paul-Émile Lecoq de Boisbaudran

La mythologie n'est pas en reste : le vanadium tire son nom de la déesse scandinave de la beauté Vanadis, à cause des coloris de ses composés; le cobalt de Kobold, lutin malicieux qui, dans la tradition germanique, aurait dérobé l'argent pour le remplacer par ce minerai jugé inutilisable; le sélénium (de Séléne, déesse grecque de la Lune), apparenté au tellure (de Tellus, déesse romaine de la Terre). Ce sont parfois les matériaux dont sont extraits les éléments que l'on retrouve dans leur appellation : le béryl pour le béryllium (anciennement glucinium, à cause de son goût sucré), la fluorine pour le fluor, l'alun pour l'aluminium, la silice pour le silicium. L'al-

chimie a appelé mercure l'hydrargyrum, mot latin dérivé des termes grecs *hydor* (« eau ») et *argyros* (« argent ») et qui signifie « argent liquide » ou « vif-argent », car ce métal, mi-liquide mi-solide, a un caractère ambigu qui rappelait aux alchimistes le dieu éponyme. Ils associaient ainsi le cuivre à Vénus, le fer à Mars, l'or au Soleil, l'argent à la Lune.

Le chimiste suédois Jöns Jacob Berzelius (1779-1848) est à l'origine des symboles attribués aux éléments chimiques. Ils sont représentés par une lettre majuscule éventuellement suivie par une minuscule (parfois deux), par exemple F pour le fluor, Al pour l'aluminium, Sb pour l'antimoine. La première lettre du symbole est très souvent l'initiale du nom de l'élément. Font exception l'azote (N, du latin *nitrogenium*), sodium (Na, du latin *natrium*), le potassium (K, du latin *kalium*), l'étain (Sn, du latin *stannum*), l'antimoine (Sb, du latin *stibinus*), le tungstène (W, de l'allemand *Wolfram*), le mercure (Hg, du latin *hydrargyrum*), et l'or (Au, du latin *aurum*).

On connaît 118 éléments, les quatre derniers ayant reçu leur nom en 2016. Seuls les 94 premiers sont observés sur terre (Z=94 correspond au plutonium Pu), certains à l'état de trace (Tc, Pm, At, Fr, Np, Pu). Les autres éléments ont été créés artificiellement par réaction nucléaire à partir d'éléments plus légers. Quarante-vingt des 118 éléments dont Z est compris entre 1 et 82 possèdent au moins un isotope stable. Les deux qui font exception sont le technétium Tc (Z=43) et le prométhium Pm (Z=61).

Une fois les éléments recensés, nous pouvons en faire la liste par ordre croissant de numéro atomique, mais c'est fas-

tidieux. Nous pouvons essayer de les classer. Certains ont des propriétés chimiques voisines et pourraient être regroupés.

Petite histoire du tableau périodique

Avant 1700, on connaissait douze éléments; en 1900, plus de quatre-vingt. Antoine Lavoisier, Antoine-François Fourcroy et d'autres, à la fin du XVIII^e siècle, font une liste des éléments connus, une vingtaine, mais y mêlent la lumière, le calorique, ainsi qu'un nombre de substances comme le radical acétique, le radical tartrique, etc., qui sont en fait des substances composées (*voir figure 1*).

La notion de poids (masse) atomique élaborée par le chimiste et physicien britannique John Dalton en 1808 va permettre de comparer la masse des différents corps grâce, entre autres, aux lois sur les gaz de Gay-Lussac : « Les volumes de deux gaz qui se combinent sont entre eux dans des rapports simples » et d'Avogadro : « Des volumes égaux de gaz pris à la même température et à la même pression contiennent le même nombre de molécules », ce qui permet de déterminer les poids (masses) atomiques à partir des mesures de la densité gazeuse. Vers 1880, on possède un système cohérent de poids atomiques.

Les premiers essais de regroupement se font par triades : le chimiste allemand Johann Döbereiner, de 1817 à 1850, en met en exergue une vingtaine. Par exemple, les halogènes (étymologiquement « qui engendrent les sels ») Cl, Br et I ont la même facilité à former un ion négatif et le poids atomique de Br se trouve être la moyenne de ceux de Cl et I. Le Français Jean-Baptiste Dumas, en 1859, propose des tétrades en adjoignant un élément aux triades. Il ajoute le fluor F à Cl, Br et I, complétant ainsi le groupe des halogènes. Le géologue et minéralogiste Alexandre-Émile Béguyer de Chancourtois est le premier en 1862 à remarquer la périodicité des propriétés chimiques. Il propose une répartition des éléments sur un cylindre divisé en seize parties, sur lequel les éléments aux propriétés similaires apparaissent les uns au-dessus des autres. Cette disposition est nommée la vis tellurique. À son tour, le Britannique John Newlands organise en 1863 les éléments par masse atomique croissante en re-

192 DES SUBSTANCES SIMPLES.
TABLEAU DES SUBSTANCES SIMPLES.

	Noms nouveaux.	Noms anciens correspondans.
	Lumière.....	Lumière. Chaleur.
	Calorique.....	Principe de la chaleur. Fluide igné.
Substances simples qui se rapportent aux trois règnes & qu'on peut regarder comme les éléments des corps.	Oxygène.....	Feu. Matière du feu & de la chaleur. Air déphlogistiqué. Air empirical.
	Azote.....	Air vital. Bâse de l'air vital. Gaz phlogistiqué.
	Hydrogène.....	Acide. Bâse de la mofette. Gaz inflammable. Bâse du gaz inflammable.
Substances simples non vitalligènes, variabiles & indéfinissables.	Soufre.....	Soufre.
	Phosphore.....	Phosphore.
	Carbone.....	Charbon pur.
	Radical muriatique.	Inconnu.
	Radical boracique.....	Inconnu.
	Antimoine.....	Antimoine.
	Argent.....	Argent.
	Arsenic.....	Arsenic.
	Bismuth.....	Bismuth.
	Cobalt.....	Cobalt.
	Cuivre.....	Cuivre.
	Etain.....	Etain.
Substances simples métalliques, variabiles & indéfinissables.	Fer.....	Fer.
	Manganèse.....	Manganèse.
	Mercure.....	Mercure.
	Molybdène.....	Molybdène.
	Nickel.....	Nickel.
	Or.....	Or.
	Platine.....	Platine.
	Plomb.....	Plomb.
	Tungstène.....	Tungstène.
	Zinc.....	Zinc.
	Chaux.....	Terre calcaire, chaux.
	Magnésie.....	Magnésie, base du sel d'Épsum.
	Baryte.....	Baryte, terre pesante.
	Alumine.....	Argile, terre de l'alun, base de l'étain.
	Silice.....	Terre siliceuse, terre vitrifiable.

Figure 1. Tableau des substances « simples » extrait du « Traité élémentaire de chimie » d'Antoine Lavoisier, 1789. DR

ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ,
ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

				Ti=50	Zr= 90	?=180.
				V=51	Nb= 94	Ta=182.
				Cr=52	Mo= 96	W=186.
				Mn=55	Rh=104,4	Pt=197,1.
				Fe=56	Ru=104,4	Ir=198.
				Ni=C o=59	Pd=106,6	Os=199.
H=1				Cu=63,4	Ag=108	Hg=200.
	Be= 9,4	Mg=24	Zn=65,2	Cd=112		
	B=11	Al=27,3	?=68	Ur=116	Au=197?	
	C=12	Si=28	?=70	Sn=118		
	N=14	P=31	As=75	Sb=122	Bi=210?	
	O=16	S=32	Se=79,4	Te=128?		
	F=19	Cl=35,5	Br=80	I=127		
Li=7	Na=23	K=39	Rb=85,4	Cs=133	Tl=204.	
		Ca=40	Sr=87,6	Ba=137	Pb=207.	
		?=45	Ce=92			
		?Er=56	La=94			
		?Yt=60	Di=95			
		?In=75,6	Th=118?			

Д. Менделѣевъ

Figure 2. Tableau de Mendeleïev publié en 1870. DR

groupant par ligne ceux qui ont des propriétés chimiques voisines. Il prévoit l'existence d'éléments non encore trouvés jusqu'alors. L'Anglais William Odling, quant à lui, arrive à une classification proche de celle de Mendeleïev et y introduit des places vacantes.

Avec le chimiste allemand Julius Lothar Meyer, nous nous approchons des représentations connues où la périodicité apparaît clairement. Les métaux de transition sont introduits dans la classification, mais les colonnes de son tableau correspondent aux lignes actuelles et vice versa. Le savant russe Dmitri Mendeleïev n'arrive pas de nulle part, scientifiquement parlant, et que, contrairement à la légende d'une intuition soudaine après une nuit d'insomnie, son tableau (1869) est l'aboutissement de toute une

chaîne de tâtonnements – à l'image de la plupart des démarches scientifiques. Il est persuadé qu'une loi générale préside au rangement des éléments, à savoir que les propriétés des corps simples et composés dépendent d'une façon périodique des poids (masses) atomiques des éléments, ces propriétés étant elles-mêmes celles des éléments qui les composent. Il range les éléments dans l'ordre des masses atomiques croissantes et organise des rangées par cycle de propriétés voisines (voir figure 2). On y reconnaît la rangée des alcalins (Na, K, etc.) et des alcalino-terreux (Ca, Sr, etc.). Dans celle qui débute par le carbone C, après le silicium Si, il laisse une lacune pour un élément non encore connu et prévoit sa masse atomique. Il l'appelle l'éka-silicium (le préfixe *éka* vient du sanscrit et signifie « un »). Ce sera le germanium,

												13	14	15	16	17	18		
Périodes	1	1 H											2 He						
	2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
	3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
	4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
	5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
	6	55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
	7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
		Lanthanides		58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
		Actinides		90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr		

Figure 3. Tableau périodique des éléments chiniques. DR

découvert par l'Allemand Clemens Winkler en 1886, de masse atomique 72,6 (proche de 70 prévu par Mendeleïev) et dont les propriétés ressemblent à celles du silicium. Mendeleïev réalise donc la cristallisation de la notion de périodicité qui, nous le verrons plus loin, résulte de la structure électronique des éléments.

Des perfectionnements interviendront quand on découvrira les gaz rares (comme l'argon en 1884) et pour lesquels Mendeleïev n'avait pas réservé de place. En effet, ces gaz sont pratiquement inertes chimiquement et il avait été très difficile de les mettre en évidence. Une étape supplémentaire est franchie lorsqu'on décide de classer les éléments non pas par masse atomique croissante mais par numéro atomique Z croissant (Antonius van den Broek, phy-

sicien néerlandais, en 1913). Le tableau sera complété en 1944 par l'Américain Glenn Seaborg, avec les actinides, qui comprennent l'uranium. D'où le tableau actuel, dont nous allons voir à quoi il correspond du point de vue de la construction électronique (*voir figure 3*). Il faut savoir que d'autres représentations continuent à être proposées : tableau en escargot, tableaux 3D, etc. Mais d'où vient, du point de vue de la composition intime de la matière, ce classement et cette périodicité? Il faut chercher la réponse dans la répartition énergétique des électrons dans les atomes.

Structure électronique et classification périodique

L'électron n'a été mis en évidence qu'en 1897 par le physicien britannique Joseph John Thomson, et le noyau ato-

mique qu'au début du xx^e siècle par le chimiste néo-zélandais Ernest Rutherford. Il est fascinant de constater que le classement des éléments et la construction du tableau périodique ont été faits sans la connaissance précise de ce qu'est un atome, dont les conceptions modernes s'élaborent au début du xx^e siècle, bien après les premières constructions du tableau périodique par Rutherford, Bohr, etc.

Pour décrire le comportement des électrons qui gravitent autour du noyau, où est concentrée quasiment toute la masse de l'atome, nous devons faire appel à la mécanique quantique. Le modèle d'une particule tournant autour d'un point central, telle une planète autour du Soleil, ne permet pas, avec les seuls outils de la mécanique classique, de rendre compte des propriétés des électrons. En 1926, le savant autrichien Erwin Schrödinger a proposé une équation qui traduit le comportement ondulatoire de l'électron au sein de l'atome d'hydrogène (dualité onde-particule). Elle permet de calculer la probabilité de trouver l'électron dans une portion donnée de l'espace et non sa position précise. L'énergie de l'électron et son moment orbital autour du noyau et sur lui-même sont quantifiés, c'est-à-dire qu'ils ne peuvent prendre que des valeurs discrètes. Ceci a pour conséquence que les électrons se répartissent en couches. Elles se remplissent en ajoutant les électrons un à un, ce qui revient à se déplacer de la gauche vers la droite dans le tableau sur une ligne – ou période – donnée. Une fois remplie, on passe à la période suivante. Chaque couche, à l'exception de la première,

possède des sous-couches, deux pour les périodes 2 et 3 (notées s et p), trois pour les périodes 4 et 5 (s, p et d), quatre pour les rangs 6 et 7 (s, p, d et f). L'existence des sous-couches est liée à la quantification du moment orbital des électrons.

Le nombre d'électrons que peut accepter une sous-couche est limité : deux, six, dix et quatorze au maximum pour les sous-couches s, p, d et f, respectivement. Le tableau peut alors se diviser en blocs s, p, d et f, d'après le nom de la dernière sous-couche occupée (*voir figure 4*). Les couches électroniques complètes constituent le cœur. Elles ne participent pas directement à la chimie de l'élément. Les électrons qui viennent s'ajouter à la dernière couche du cœur sont les électrons de valence et sont responsables des propriétés chimiques de l'élément. Tous les atomes d'une même période possèdent un cœur identique, celui du gaz noble qui terminait la période précédente. Par exemple, les éléments de la troisième période ont un cœur qui correspond à la configuration électronique du néon.

On appelle groupe ce qui rassemble les éléments d'une même colonne. Ils possèdent des couches de valence similaires, ce qui leur confère des propriétés chimiques voisines. Les groupes sont notés de 1 à 18 en ne considérant que les blocs s, p et d, car il y a dix-huit électrons de valence au maximum dans ce cas. Ceci n'est valable que jusqu'à la cinquième période. Le groupe 1 correspond aux alcalins (Li, Na, K, Cs, Rb et Fr), qui n'ont qu'un électron de valence et qui peuvent s'en séparer facilement, donnant lieu à une chimie ionique. Le groupe 2 renferme les alcalino-terreux, qui, eux aussi, perdent aisément leurs électrons de va-

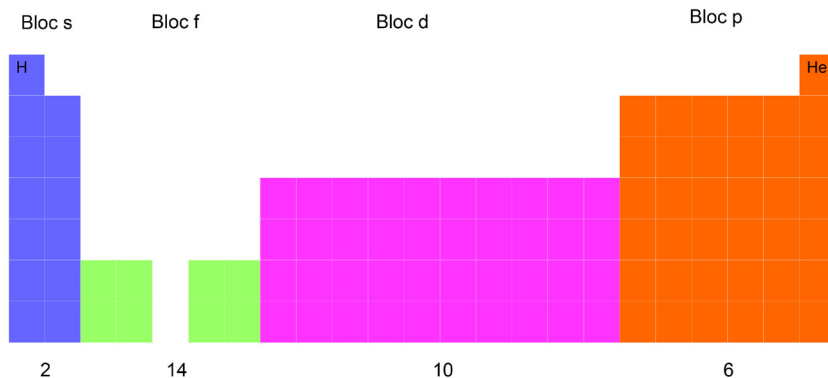


Figure 4. Organisation du tableau périodique en blocs. DR

lence. On les trouve la plupart du temps sous une forme où ils sont deux fois ionisés, comme le calcium dans le calcaire CaCO_3 où l'ion Ca^{++} est associé au carbonate CO_3^{2-} . Le caractère ionique des éléments les plus légers du groupe (Be, Mg) est un peu moins prononcé et on voit apparaître des relations diagonales. Be a, par exemple, une chimie qui ressemble à celle de l'aluminium, qui appartient à la période suivante et au groupe 12.

La colonne 18 est celle des gaz rares qui ont une couche de valence saturée, d'où leur inertie chimique. La colonne 17 correspond aux halogènes, dont l'étymologie signifie «qui engendre les sels». Il ne manque qu'un électron à ces éléments pour atteindre la configuration des gaz rares. C'est la raison pour laquelle on les trouve souvent sous la forme d'anions, c'est-à-dire d'ions porteurs d'une charge négative qui donnent des composés très stables avec les alcalins et alcalino-terreux, tels que NaCl , CaCl_2 . Ce sont des non-métaux. Les colonnes 13 à 16 contiennent à la fois des métaux (aluminium Al, étain Sn, plomb Pb, etc.), des se-

mi-métaux (silicium Si, arsenic As, antimoine Sb, etc.) et des non-métaux (azote N, oxygène O, phosphore P, soufre S). On retrouve les relations diagonales évoquées plus haut (voir par exemple la répartition des semi-métaux).


Le bloc d est celui des métaux de transition et occupe les colonnes 3 à 12. On n'y trouve que des métaux dont les propriétés sont intermédiaires entre celles des métaux des groupes 1 et 2 et celles des métaux du bloc s. À partir de la sixième période apparaissent des éléments avec des sous-couches f. Ce sont les lanthanides ou terres rares, puis les actinides, dont tous les représentants sont radioactifs (uranium, plutonium...). Ils sont classés à part dans le tableau périodique pour des raisons pratiques de présentation, car si on les faisait figurer entre les blocs s et d, le tableau serait trop large et perdrait en visibilité. Tous les lanthanides ont des propriétés chimiques très voisines, car leurs électrons de valence se trouvent dans des sous-couches f internes. Comme ils se

ressemblent, il est difficile de les séparer. Les obtenir purs à partir des minerais, où ils sont souvent mélangés, nécessite de nombreuses étapes, au cours desquelles la concentration d'un élément est favorisée pas à pas par des procédés chimiques qui jouent sur les légères différences entre leurs propriétés.

Conclusion

Nous avons sous les yeux, avec le tableau périodique, tout ce qui constitue la matière de l'univers organisée en familles, en périodes, en groupes. C'est un outil indispensable au chimiste, au physicien et au géologue. Il permet de voir les affinités dans les familles, les évolutions dans les périodes, les ressemblances dans les groupes. Nous pressentons les efforts qu'il faudra déployer pour séparer les éléments d'une même colonne ou ceux qui se côtoient dans une même rangée. À partir de considérations sur la structure électronique directement lisible sur le tableau, des évolutions des propriétés chimiques et physiques pourront être déduites relativement facilement. Voilà la matière élémentaire rangée, triée et organisée, tirée du brouillard des interprétations philosophico-religieuses originelles et du chaos des combinaisons multiples des éléments entre eux, tout du moins dans notre conception actuelle. Nous ne pouvons qu'être ébahis devant ce résumé du monde matériel, qui est aussi celui du vivant, en une centaine de cases quasiment immuables où seules les désintégrations radioactives ou les transmutations par réactions nucléaires dans les étoiles et lors d'expériences dans des cyclotrons permettent le passage d'un élément à un autre. Toute cette matière représente

également de l'énergie, que l'on récupère lors des opérations de fission (centrales nucléaires) et de fusion (Soleil).

Certains, les plus nombreux, n'y verront que la conséquence implacable des théories physiques, mais d'autres en dégagent une belle image du monde. Le poète allemand Novalis, qui était aussi un praticien de la balbutiante chimie de la fin du XVIII^e siècle, voulait allier science et poésie et découvrir les signes cachés qui permettent de décrire le monde. Soixante-dix ans plus tard environ, Mendeleïev concrétisera en quelque sorte son rêve. La poésie est non seulement un art mais aussi, étymologiquement, l'action de faire, de créer. Pour le 150^e anniversaire du tableau périodique, le collectif de poètes Laboratoire Novalis, qui veut réconcilier science et poésie, réalisera un ouvrage où chacun des 118 éléments est célébré par un poème. C'est un moyen de marquer sa place dans le monde et d'y être pleinement associé, de ne pas perdre la main en quelque sorte. Ainsi, Primo Levi, dans son ouvrage *Le Système périodique* (éd. Albin Michel, 1987), mêle la description d'une vingtaine d'éléments chimiques à des épisodes de sa propre vie, dramatique à bien des égards. Nous pouvons y lire : « Je dis que la noblesse de l'homme, acquise au cours de cent siècles d'essais et d'erreurs, avait consisté à le rendre maître de la matière... Que vaincre la matière, c'est la comprendre, et il est nécessaire de comprendre la matière pour comprendre l'univers et nous-mêmes ; et que le système périodique de Mendeleïev... était une poésie, plus haute et plus solennelle que toutes les poésies digérées au lycée... » 

BIBLIOGRAPHIE

ALLEAU René, « Théorie des éléments », *Encyclopaedia Universalis*, vol. 6, 1972.

ATKINS Peter et JONES Loretta, *Chimie*, éd. De Boeck Université, Paris, plusieurs éditions.

LEVI Primo, *Le Système périodique*, éd. Albin Michel, Paris, 1987, parution initiale en 1975 en italien.

LABORATOIRE NOVALIS (collectif), *Le Système poétique des éléments*, éd. Invenit, Lille, 2019.

BARBAUD Fanny, MOLINA Émilie et PÉAN Clarisse, « La classification périodique, de Lavoisier à Mendeleïev », article publié le 25 janvier 2011 sur le site CultureSciences-Chimie. ➡ culturesciences.chimie.ens.fr/thematiques/histoire-de-la-chimie/la-classification-periodique-de-lavoisier-a-mendeleiev