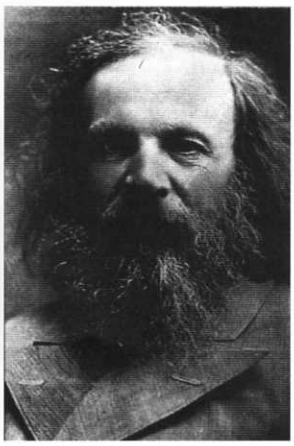
La périodicité des éléments

Deuxième partie

LARRY HECHT



Dimitri Mendeleïev

Seconde partie de la série d'études pédagogiques sur les bases scientifiques de l'énergie atomique (voir *L'hypothèse d'Avogadro* dans *Fusion 110*)

Dimitri Mendeleïev découvrit le concept de périodicité des éléments en 1869, alors qu'il écrivait un manuel sur la chimie inorganique. L'idée nouvelle et capitale, comme il la décrivit lui-même, était que lorsque les éléments sont ordonnés dans l'ordre ascendant en terme de poids atomique, ils montraient, non pas une croissance dans leur puissance ou qualité mais des propriétés qui revenaient de manière périodique. Pour Mendeleïev il était clair que cette découverte le mena vers une conception de la masse très différente de celle de la physique de Galilée ou de Newton, où elle n'est considérée que comme une propriété scalaire (comme dans $F = ma$). Mendeleïev pensa qu'une nouvelle vision de la physique émergerait de cette découverte chimique ; ce qui se produisit, en partie, avec les développements qui permirent une maîtrise des processus nucléaires, même si les fondations erronées des conceptions anti-leibniziennes injectées dans la science par l'hégémonie impériale britannique ne furent jamais entièrement redressées. Ce type de conception, auquel le modèle nucléaire du Pr. Robert Moon est lié, aidera à renforcer l'intuition de Mendeleïev à ce sujet.

LA RADIOACTIVITÉ ET L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE N'AURAIENT PAS ÉTÉ POSSIBLES SANS LA PROUESSE DE MENDELEÏEV

Il n'existe que quatre-vingt-douze éléments naturels dans l'univers et la découverte de leur existence et de leur organisation dans le tableau périodique est le fait le plus fondamental de la science moderne. Nous allons voir comment d'autres découvertes comme celles de la radioactivité et de l'énergie nucléaire n'auraient pas été possible sans la prouesse de Mendeleïev. Mais examinons d'abord l'idée générale de ce qu'est le tableau périodique, après quoi nous reviendrons sur les considérations qui amenèrent Mendeleïev à formuler son hypothèse.

Le tableau périodique organise les quatre-vingt-douze éléments en plusieurs systèmes (**Figure 1**). Les rangées horizontales sont appelées « périodes » ou « séries », et les colonnes verticales, des « groupes ». Le principe d'organisation le plus simple est que les propriétés des éléments d'un même groupe sont similaires. Parmi ces propriétés partagées par les éléments d'un même groupe, on trouve : leurs cristaux, et les cristaux des composés qu'ils forment avec d'autres substances, sont habituellement de forme similaire. Les éléments d'un même groupe tendent à se combiner avec des substances similaires, et le font dans des proportions identiques. Leurs composés possèdent par conséquent souvent des propriétés similaires. Ainsi le chlorure de sodium (NaCl), ou sel de table, et le chlorure de potassium (KCl) se combinent dans les mêmes proportions (1:1) et montrent les mêmes propriétés chimiques et physiques. En partie parce qu'ils tendent à faire les mêmes combinaisons chimiques, les membres d'un groupe, et parfois ceux des groupes adjacents, sont souvent rassemblés, dans la nature, dans les mêmes gîtes métallifères. Par exemple, le cuivre apparaît souvent au sein d'un même minerai avec le zinc et le plomb, ou avec le nickel et des traces de platine. Si vous regardez dans le tableau périodique, vous verrez que ces éléments sont situés dans des colonnes adjacentes. Ou, lorsque le plomb est fondu, des traces de cuivre, d'argent et d'or (qui occupent une colonne pas très éloignée sur la gauche), ainsi que des traces d'arsenic (dans la colonne adjacente sur la droite) sont récupérées. Nous

reviendrons ultérieurement sur ce type de relations.

Afin d'éviter toute confusion, nous incluons ici un avertissement. Lorsque le tableau périodique est enseigné dans les écoles aujourd'hui, il est habituellement présenté comme un principe d'ordonnancement des couches d'électrons qui, suppose-t-on, entourent le noyau de l'atome. L'explication moderne des réactions chimiques fait appel à l'interaction des électrons des couches supérieures. Il est important de réaliser qu'à l'époque de Mendeleïev aucun chimiste n'avait une quelconque idée de l'existence des noyaux atomiques ni des électrons. L'électron n'était considéré que comme une entité théorique dans les travaux de Wilhem Weber sur l'électrodynamique (1804-1891). Mais cela avait très peu à voir avec la pensée des chimistes de cette époque. C'est au début du XXe siècle qu'on obtint la première approximation de la masse de l'électron et en 1926 qu'on effectua la validation expérimentale de ses propriétés ondulatoires. Dans la conception de l'atome qui prévalait au début du XXe siècle, il n'y avait pas de noyau central, mais plutôt une dispersion homogène des charges. Par conséquent, lorsqu'on tente de comprendre comment Mendeleïev arriva à sa découverte du tableau périodique des éléments, on doit écarter la plupart de ce que l'on peut avoir appris à ce sujet. Bien qu'ayant quelques réticences à abandonner le peu que nous pensons savoir à ce sujet, nous nous verrons rapidement récompensés par un plaisir bien supérieur, en découvrant comment ces découvertes furent réellement accomplies. Nous tirerons également avantage d'apprendre quelles suppositions sous-jacentes doivent être corrigées si nous voulons faire face aux défis qui vont se présenter à nous dans les cinquante prochaines années. En organisant les éléments dans un ordre croissant de poids atomique, Mendeleïev découvrit qu'ils aboutissaient dans des périodes qui se répétaient, de manière à ce que les éléments possédant des propriétés analogues se retrouvent dans une colonne commune, les uns en dessous des autres. A l'intérieur de ces périodes, plusieurs propriétés, telles que la valence (les nombres entiers de faible valeur définissant les proportions dans lesquelles les éléments se combinent entre eux), les points de fusion et d'ébullition, les volumes atomiques (sur lesquels nous nous pencherons plus loin) montrent des accroissements et décroissements progressifs, analogues pour chaque période.

En examinant ces propriétés périodiques, on pouvait voir, dans le tableau,

THE PERIODS OF THE CHEMICAL ELEMENTS, TAKING THE ATOMIC WEIGHT OF O = 16.

Higher saline oxides.	Groups.	Elements of even series.				
R_2O	I	K=39·1	Rb= 85·4	Cs=132·9	—	—
RO	II	Ca=40·1	Sr= 87·6	Ba=137·4	—	Rd=224^7
R_2O_3	III	Sc=44·1	Y= 89·0	La=139	Yb=173	—
RO_2	IV	Ti=48·1	Zr= 90·6	Ce=140^6	—	Th=232
R_2O_5	V	V=51·4	Nb= 94·0	—	Ta=183	—
RO_3	VI	Cr=52·1	Mo= 96·0	—	W=184	U=239
R_2O_7	VII	Mn=55·0	?= 99^1	—	—	
	VIII	Fe=55·9	Ru=101·7	—	Os=191	
		Co=59	Rh=103·0	—	Ir=193	
		Ni=59^3	Pd=106·5	—	Pt=194·9	

Gaseous hydrogen compounds.	Higher saline oxides.	Groups.	Typical elements.			Elements of uneven series.			
	R_2O	I	H=1·008	Li= 7·03	Na=23·05	Cu=63·6	Ag=107·9	—	Au=197·2
	RO	II		Be= 9·1	Mg=24·3	Zn=65·4	Cd=112·4	—	Hg=200·0
	R_2O_3	III		B=11·0	Al=27·0	Ga=70·0	In=114·0	—	Tl=204·1
RH_4	RO_2	IV		C=12·0	Si=28·4	Ge=72·3	Sn=119·0	—	Pb=206·9
RH_3	R_2O_5	V		N=14·04	P=31·0	As=75·0	Sb=120·0	—	Bi=208
RH_2	RO_3	VI		O=16·00	S=32·06	Se=79	Te=127^5	—	—
RH	R_2O_7	VII		F=19·0	Cl=35·45	Br=79·95	I=127	—	—
0	0	0^1	He=4·0	Ne=19·9	Ar=38^2	Kr=81·8	Xe=128	—	—

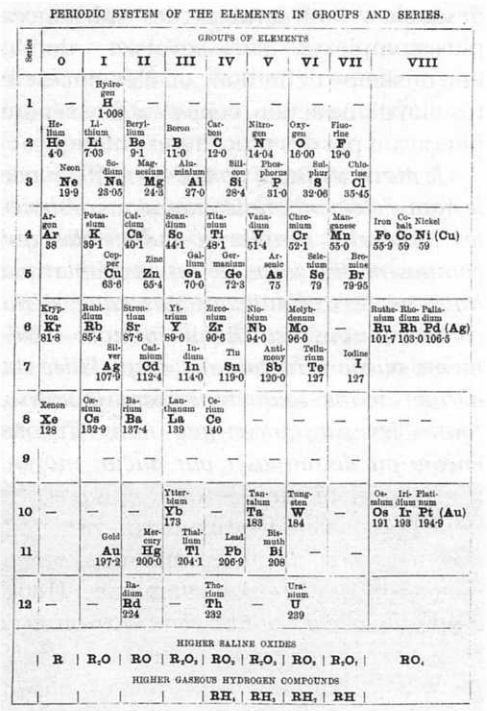
D. MENDELÉEFF.
1869–1902.

Figure 1
Le tableau périodique de Mendeleïev

un certain nombre de trous. Certains pensaient que ces trous découlaient d'une faiblesse dans l'hypothèse de Mendeleïev. Mais celui-ci était convaincu de la justesse de sa conception et que les trous représentaient des éléments à découvrir. Il définit les propriétés probables de certains de ces éléments inconnus sur la base de l'analogie avec les éléments voisins. Moins de dix ans après la publication du concept de périodicité, on découvrit plusieurs des éléments manquants. Par exemple, dans le quatrième groupe, (le quatorzième dans le système élargi adopté en 1984), plus bas dans la colonne comprenant le carbone et le silicium, selon Mendeleïev, il devait exister un élément encore inconnu à l'époque. Il l'appela eka-silicium, le préfixe eka signifiant *un* en sanskrit. En étudiant les propriétés du silicium situé au-dessus et celles de l'étain situé au-dessous, ainsi que celle du zinc et de l'arsenic dans les colonnes adjacentes, il devina les propriétés de l'élément manquant : son poids atomique, le point d'ébullition probable de certains de ses composés et sa gravité spécifique. En 1886, C. Winkler, du célèbre centre minier de Freiberg en Saxe, découvrit le nouvel élément dans un minéral provenant de la mine de Himmelsfurt et l'appela germanium. Ses propriétés correspondaient totalement avec celles prévues par Mendeleïev.

Il y avait aussi un trou dans la troisième colonne (le treizième dans le nouveau système), situé juste au-dessous du bore et de l'aluminium. En 1871, Mendeleïev avait nommé cet élément inconnu eka-aluminium. En 1875, Lecoq de Boisbaudran découvrit, avec des techniques d'analyse spectrale, un nouveau métal dans un minerai de blende de zinc provenant des Pyrénées. Il l'appela gallium. Au premier abord, sa densité semblait différer de celle prévue, mais les observations ultérieures montrèrent que le nouvel élément possédait la densité, la masse atomique et les propriétés chimiques anticipées par Mendeleïev.

Voilà l'essentiel du concept de périodicité. Mais pour y parvenir, Mendeleïev dut d'abord effectuer des recherches approfondies dans le domaine de la chimie. La condition préalable la plus importante fut peut-être la découverte de nouveaux éléments chimiques. Les anciens connaissaient dix des substances que nous appelons aujourd'hui éléments, la plupart étant des métaux. Il s'agissait du fer, du cuivre, du plomb, de l'étain, de l'antimoine, du



PERIODIC SYSTEM OF THE ELEMENTS IN GROUPS AND SERIES.

Series	GROUPS OF ELEMENTS								
	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	—	Hydrogen H 1·008	—	—	—	—	—	—	
2	Helium He 4·0	Lithium Li 7·03	Beryllium Be 9·1	Boron B 11·0	Carbon C 12·0	Nitrogen N 14·04	Oxygen O 16·00	Fluorine F 19·0	
3	Neon Ne 19·9	Sodium Na 23·05	Magnesium Mg 24·3	Aluminium Al 27·0	Silicon Si 28·4	Phosphorus P 31·0	Sulphur S 32·06	Chlorine Cl 35·45	
4	Argon Ar 38	Potassium K 39·1	Calcium Ca 40·1	Scandium Sc 44·1	Titanium Ti 48·1	Vanadium V 51·4	Chromium Cr 52·1	Manganese Mn 55·0	Iron Fe 55·9 / Cobalt Co 59 / Nickel Ni 59 (Cu)
5		Copper Cu 63·6	Zinc Zn 65·4	Gallium Ga 70·0	Germanium Ge 72·3	Arsenic As 75	Selenium Se 79	Bromine Br 79·95	
6	Krypton Kr 81·8	Rubidium Rb 85·4	Strontium Sr 87·6	Yttrium Y 89·0	Zirconium Zr 90·6	Niobium Nb 94·0	Molybdenum Mo 96·0	—	Ruthenium Ru 101·7 / Rhodium Rh 103·0 / Palladium Pd 106·5 (Ag)
7		Silver Ag 107·9	Cadmium Cd 112·4	Indium In 114·0	Tin Sn 119·0	Antimony Sb 120·0	Tellurium Te 127	Iodine I 127	
8	Xenon Xe 128	Caesium Cs 132·9	Barium Ba 137·4	Lanthanum La 139	Cerium Ce 140	—	—	—	— — —
9		—	—	—	—	—	—	—	
10	—	—	—	Ytterbium Yb 173	—	Tantalum Ta 183	Tungsten W 184	—	Osmium Os 191 / Iridium Ir 193 / Platinum Pt 194·9
11		Gold Au 197·2	Mercury Hg 200·0	Thallium Tl 204·1	Lead Pb 206·9	Bismuth Bi 208	—	—	
12	—	—	Radium Rd 224	—	Thorium Th 232	—	Uranium U 239		
					HIGHER SALINE OXIDES				
	R	R_2O	RO	R_2O_3	RO_2	R_2O_5	RO_3	R_2O_7	RO_4
					HIGHER GASEOUS HYDROGEN COMPOUNDS				
					RH_4	RH_3	RH_2	RH	

mercure, de l'argent, de l'or, du carbone et du soufre [1]. Pour le restant, tous sauf, deux furent découverts à l'époque moderne : entre 1735 et 1803, treize nouveaux métaux et quatre éléments gazeux ; en 1808 six nouveaux éléments des groupes alcalins et alcalino-terreux (groupes I et II) furent ajoutés [2]. Et les découvertes se succédèrent tout au long du XIXe siècle, couronnées par l'isolement du radium par Marie Curie en 1898. Lorsque Mendeleïev conçut, en 1868, son tableau périodique, deux tiers des quatre-vingt-douze éléments naturels étaient connus. Il restait toutefois à en découvrir encore quelques uns au cours du XXe siècle. Puis vint ensuite la synthèse artificielle d'éléments additionnels, au-delà des quatre-vingt-douze éléments naturels, à commencer par le neptunium puis le plutonium.

Mais qu'entendons-nous par élément ? La chimie s'occupe d'abord de substances homogènes, dont les parties ne peuvent se distinguer les unes des autres. Mais le fait qu'une substance soit la même dans toutes ses parties ne la distingue pas d'un élément. Le souffre, considéré comme un élément, prend la forme d'une poudre jaune, mais plusieurs composés comme les sels de chrome peuvent prendre une apparence similaire. Le sel de table est uniforme et cristallin, mais n'est pas pour autant un élément. Nous considérons l'hydrogène gazeux comme un élément mais la dioxine de carbone comme un composé. Quelques fois nous décrivons les éléments comme des briques élémentaires à partir

Figure 2
Ancienne classification des éléments en groupe et en série

1. La métallurgie et l'exploitation minière sont une partie de la science ancienne, même si la pensée et le processus de découverte qui lui étaient associés ont pour la plupart été perdus. Heinrich Schliemann, le découvreur de Troie, suggère que le mot métal vient du Grec *met' alla*, signifiant chercher quelque chose, ou rechercher. Des ruines archéologiques indiquent un ordonnancement dans la découverte des métaux et la capacité à les travailler, le cuivre et ses alliages précédant le fer par exemple. Le travail du fer est associé aux Hittites et aux Etrusques, des cultures maritimes d'Anatolie et du Centre Nord de l'Italie, qui parlaient une langue commune liée au punique ou au phénicien.

2. Les quatre éléments gazeux étaient l'hydrogène (Henry Cavendish, 1766) ; l'azote (Daniel Rutherford, 1772) ; l'oxygène (Carl Scheele, Joseph Priestley, 1772) ; le chlore (Scheele, 1774). Parmi les métaux découverts au cours du XVIIIe siècle on trouve : le platine (Antonio de Ulloa, 1735) ; le cobalt (Georg Brandt, 1735) ; le zinc (Andreas Marggraf, 1746) ; le nickel (Axel Cronstedt, 1751) ; le bismuth (Geoffroy, 1753) ; le molybdène (Carl Scheele, 1778) ; le zirconium (Martin Klaproth, 1778) ; le tellure (Muller, 1782) ; le tungstène (Juan et Fausto d'Elhuyar, 1788) ; l'uranium (Klaproth, 1789) ; le titane (William Gregor, 1791) ; le chrome (Louis Vauquelin, 1797) ; et le béryllium (Vauquelin, 1798).
...↘

↘...
En 1803, William Hyde Wollaston et Smithson Tennant découvrirent le rhodium, le palladium, l'osmium et l'iridium dans le minerai de platine. En 1808, Humphry Davy réussit à isoler les éléments alcalins suivants : le sodium, le potassium, le magnésium, le calcium, le strontium et le baryum par l'électrolyse de leurs sels fondus.

3. Antoine-Laurent de Lavoisier (1743-1794). *Traité élémentaire de chimie*, Cuchet, Paris, 1789. Discours préliminaire, pp. XVII et XVIII.

4. Dans l'histoire de la chimie physique, l'étude des cristaux fournit l'un des premiers moyens d'accès au microcosme. Elle continue d'être d'une grande importance. Ceci est très amusant car l'œuvre enjouée de Kepler, *L'étrenne ou neige sexangulaire* (tr. Robert Halleux, Paris, J.Vrin-CNRS, 1975), est en réalité le document fondateur de la cristallographie moderne. L'étudiant doit en tirer avantage car ce sujet, tel qu'il est présenté dans les manuels scolaires habituels, est un fouillis de formalismes mathématiques et de systèmes de classifications. Dans l'opuscule de Kepler, nous voyons que la question essentielle est en réalité très simple : pourquoi un flocon de neige a-t-il six côtés ?
...↘

desquelles sont formées des substances plus complexes. Mais Lavoisier donne une meilleure définition : un élément est le résultat d'une action, et ne peut être séparé plus avant par des procédures chimiques :

« *Je me contenterai donc de dire que si par le nom d'éléments, nous entendons désigner les molécules simples et indivisibles qui composent les corps, il est probable que nous ne les connaissons pas : que si au contraire nous attachons 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 ; non pas que nous puissions affirmer que ces corps que nous regardons comme simples, ne soient pas eux-mêmes composés de deux ou même d'un plus grand nombre de principes, mais puisque ces principes ne se séparent jamais, ou plutôt puisque nous n'avons aucun moyen de les séparer, ils agissent à notre égard à la manière des corps simples, et nous ne devons les supposer composés qu'au moment où l'expérience et l'observation nous en auront fourni la preuve.* » [3]

L'avertissement de Lavoisier reste encore valable aujourd'hui. En le gardant à l'esprit, nous évitons de tomber dans le piège qui consiste à supposer que nous avons affaire à des élémentarités irréductibles, car l'histoire du progrès scientifique a montré qu'une maîtrise croissante sur la nature nous permet de toujours plonger plus profondément dans le microcosme. Pour la chimie, l'élément était une substance irréductible. Mais les développements ultérieurs nous permirent d'atteindre le niveau de l'électron, du noyau et des particules infra-atomiques.

Il était nécessaire d'effectuer des opérations chimiques sur les substances pour savoir si elles étaient des éléments ou des composés. Certaines choses considérées comme élémentaires se révélèrent être des composés. L'étude, par Lavoisier, de la séparation de l'eau en hydrogène et en oxygène gazeux, et leur reconstitution en eau est à cet égard révélatrice. Il démontra, de la même manière, que l'air atmosphérique était constitué principalement d'oxygène et d'azote. Les métaux découverts au XVIIIe siècle étaient principalement séparés de leur minerai par des processus tels que les réactions chimiques, la distillation et la séparation physique.

Au moment où Mendeleïev écrivait son traité, les expérimentateurs avaient accumulé une énorme réserve d'informations au sujet des propriétés des éléments et de leurs composés. On peut souligner en particulier les propriétés analogues des éléments et de leurs composés respectifs. Par exemple, le lithium et le baryum se comportent par certains aspects comme le sodium et le potassium, mais par d'autres aspects comme le magnésium et le calcium. Considérant ces analogies comme marqueur d'un principe d'ordonnancement sous-jacent, il supposa l'existence de propriétés quantitatives mesurables, qui allaient lui permettre de comparer les éléments. Il prit en considération quatre types de propriétés mesurables, pour les éléments et leurs composés, pour développer son concept de périodicité. Ils sont identifiés, dans le chapitre 15 de son traité, comme suit :

a) l'isomorphisme ou l'analogie des formes cristallines ;

b) les relations entre les volumes « atomiques » des composés analogues des éléments ;

c) la composition des sels formés à partir de ces éléments ;

d) les relations entre les poids atomiques des éléments.

Pensons à chaque type de propriétés comme un moyen différent de pénétrer dans le microcosme. Commençons par le premier : l'isomorphisme cristallin. Lorsqu'un composé est dissous dans l'eau ou tout autre solvant, et que l'eau est retirée par évaporation ou par d'autres moyens, on peut généralement parvenir à le cristalliser. Toutes les pierres précieuses familières et bien d'autres roches sont des cristaux qui ont été formés dans des conditions similaires à l'intérieur ou à la surface de la Terre. Le sel de table et le sucre sont des cristaux familiers. La plupart des métaux ou alliages se refroidissent et durcissent sous des formes cristallines caractéristiques. Les composés organiques, même des choses vivantes comme des protéines, peuvent être cristallisés afin de permettre l'étude de leur structure. Avec le développement de la chimie après Lavoisier, la forme cristalline commença à attirer l'attention et une étude approfondie allait montrer que tout composé se cristallise sous une forme unique. Certaines formes pouvaient être similaires, mais des mesures soignées des angles entre les faces et des proportions entre les longueurs des axes principaux ont toujours confirmé de légères différences. La cristallographie devint ainsi un instrument d'analyse chimique, et, à partir des années 1890, se constituèrent des cata-

Groupe 1	(IA,IA)	les métaux alcalins	**Groupe 11**	(IB,IB)	
Groupe 2	(IIA,IIA)	les métaux alcalino-terreux	**Groupe 12**	(IIB,IIB)	
Groupe 3	(IIIA,IIIB)	les terres rares	**Groupe 13**	(IIIB,IIIA)	le groupe du bore
Groupe 4	(IVA,IVAB)		**Groupe 14**	(IVB,IVA)	le groupe du carbone
Groupe 7	(VIIA,VIIB)		**Groupe 15**	(VB,VA)	les pnictogènes
Groupe 8	(VIIIA,VIIIB)		**Groupe 16**	(VIB,VIA)	les chalcogènes
Groupe 9	(VIIIA,VIIIB)		**Groupe 17**	(VIIB,VIIA)	les halogènes
Groupe 10	(VIIIA,VIIIB)		**Groupe 18**	(VIIIB,VIIIA)	les gaz rares

Les groupes du tableau périodique actuel (voir 3e de couverture)
Nomenclature moderne (européenne et américaine antérieures).

logues contenant les propriétés cristallographiques d'environ 100 000 composés [4]. Malgré ces très légères différences, on classa les formes générales prises par les cristaux dans un certain nombre de groupes. Il y avait le cube et l'octaèdre, les prismes hexagonaux et autres, et un grand nombre de variations à partir des solides archimédiens, leurs formes duales et bien d'autres combinaisons inhabituelles. Le chimiste allemand Eilhard Mitscherlich fut le premier à démontrer, en 1819, que plusieurs composés ayant des propriétés chimiques similaires et contenant, au sein de leurs molécules, le même nombre d'atomes présentaient également une ressemblance dans leurs formes cristallines. Il appela ces substances « isomorphes ». Il trouva que les sels formés à partir de l'acide d'arsenic (H_3AsO_4) et de l'acide phosphorique (H_3PO_4) présentaient une grande ressemblance dans leurs formes cristallines. Lorsque les deux sels étaient mélangés dans une solution unique, ils pouvaient former un cristal contenant un mélange des deux composés. Mitscherlich qualifia ainsi d'isomorphes les éléments arsenic et phosphore.

Après Mitscherlich on découvrit un grand nombre d'autres éléments exhibant un isomorphisme cristallin. Par exemple, on identifia comme composés isomorphes les sulfates de potassium, de rubidium et de césium (KSO_4, $RbSO_4$, $CsSO_4$) ; les nitrates de ces mêmes éléments étaient aussi isomorphes entre eux. Les composés de métaux alcalins comme le lithium, le sodium, le potassium et le rubidium avec les halogènes comme le fluore, le chlore, le brome et l'iode forment tous des cristaux appartenant au système cubique, c'est-à-dire des cubes et des octaèdres. La forme cubique des cristaux de chlorure de sodium (le sel de table) est un exemple que l'on peut vérifier par soi-même avec une loupe.

Ceci fut l'un des premiers indices qui suggéra à Mendeleïev le concept de périodicité. Lorsqu'il ordonna les éléments selon un ordre de poids atomique croissant, les substances isomorphes se retrouvèrent les unes en dessous des autres, formant ainsi des colonnes. L'arsenic et le phosphore se retrouvèrent ainsi dans le groupe V (15 dans la classification moderne). Les métaux alcalins se retrouvèrent dans le groupe I ; les halogènes dans le groupe VII (ou 17 dans la classification moderne).

D'autre part, les éléments d'un même groupe se combinaient les uns avec les autres dans les mêmes proportions. Grâce aux travaux de Gerhardt et Cannizzaro, qui établirent un système uniforme de poids atomiques, il était devenu facile de déterminer les formules chimiques d'un grand nombre de substances une fois connues les proportions en terme de poids des éléments constituants. On s'aperçut ainsi que les éléments du premier groupe (désignés par R) se combinaient avec ceux du septième groupe (désigné par X) dans la proportion RX, comme dans le NaCl. Les éléments du second groupe se combinaient à ceux du septième dans la proportion RX_2, comme dans $CaCl_2$, et ainsi de suite. Pour les combinaisons avec l'oxygène (les oxydes étant prédominants) le premier groupe donnerait RO, le second RO_2, le troisième RO_3 et ainsi de suite. C'est ce que Mendeleïev décrit dans son tableau périodique (**Figure 2**).

Nous allons garder le problème du volume atomique et des autres propriétés, qui sont très fascinants et montrent aussi un caractère périodique, pour une prochaine fois. *f*

↘...
Pourquoi les rayons de miel sont-ils formés de dodécaèdres rhombiques tronqués ? Comment obtenir une réponse ? Nous ne pouvons y parvenir qu'en cherchant à façonner notre imagination pour qu'elle soit en conformité avec l'esprit du créateur. Si nous n'obtenons pas la réponse complète, nous voyons néanmoins que c'est à travers l'exercice enjoué de l'esprit, lorsqu'il avance et explore des hypothèses, que nous nous approchons de la réponse.