



D'hier à demain : le tableau périodique des éléments

Léguée par Dimitri Mendeleïev, la classification périodique des éléments constitue l'une des icônes de la science. Mais ce tableau continue de susciter des interrogations.

Il orne les murs des salles de classe, des amphithéâtres et des laboratoires universitaires ou industriels. C'est l'une des images emblématiques de la science : il résume la chimie. Le tableau de la classification périodique des éléments illustre avec concision la façon dont tous les éléments chimiques connus réagissent et forment des liaisons chimiques. Il aide à comprendre, pour chaque élément, ses propriétés.

Mais le tableau périodique est tellement fondamental, omniprésent et familier dans l'étude de la chimie, qu'on le considère trop souvent comme une évidence. Un siècle après la mort du principal découvreur du tableau périodique, le chimiste russe Dimitri Mendeleïev (1834–1907), il est temps de revisiter les origines et le statut actuel de cette classification aujourd'hui classique. D'une part, le tableau périodique de Mendeleïev a eu des précurseurs. D'autre part, les scientifiques débattent encore sur la meilleure présentation possible du tableau périodique.

Comme son nom l'indique, la classification périodique des éléments montre comment certaines propriétés des éléments se répètent à intervalles réguliers. Dans le tableau actuel, les 117 éléments sont disposés en rangées, ou lignes, par numéro atomique croissant – le numéro atomique étant le nombre de protons du noyau atomique de l'élément. Le tableau comporte sept rangées, qui constituent chacune une « période ». La première période a deux éléments, les deux suivantes, huit chacune, puis 18 et 32 respectivement pour les deux paires de périodes suivantes.

Les colonnes verticales constituent les 18 groupes d'éléments ayant des propriétés chimiques semblables, liées au nombre d'électrons de la couche externe des atomes – les électrons de « valence ». Par exemple, dans le groupe 17, celui des halogènes, il manque un électron de valence pour que la couche externe soit complète ; par conséquent, tous ces éléments ont tendance à acquérir un électron lors des réactions et forment tous les acides avec l'hydrogène.

Le tableau a connu de nombreux changements depuis la publication de la première version de Mendeleïev, en 1869, laquelle faisait apparaître 8 groupes, 12 rangées et 66 éléments. Mais le tableau n'a pas surgi de nulle part. Les historiens de la chimie ont depuis longtemps reconnu l'importance de deux idées qui ont particulièrement contribué à l'avènement du tableau périodique : la notion des triades d'éléments et l'hypothèse de Prout, selon laquelle les masses atomiques des éléments sont des multiples entiers de la masse atomique de l'hydrogène, l'élément le plus léger.

Une histoire de triades

En 1817, le chimiste allemand Johann Döbereiner remarqua que plusieurs groupes de trois éléments présentaient deux caractéristiques intéressantes. L'élément du milieu de la triade avait non seulement une réactivité chimique intermédiaire, mais aussi une masse atomique intermédiaire. Différente du numéro atomique, grandeur qui n'avait pas encore été identifiée, la masse atomique était mesurée depuis le XIX^{ème} siècle. L'idée était de déterminer la masse de chaque unité indivisible de matière par rapport à l'hydrogène, dont la masse était prise comme unité.

Comme les formules de nouveaux composés étaient inconnues, la mesure des masses atomiques resta imprécise pendant un certain temps. Mais dans les triades, Döbereiner trouva que la masse de l'élément du milieu, par exemple le sélénium dans la triade soufre-sélénium-tellure, avait une masse atomique approximativement égale à la moyenne des autres. La masse atomique du soufre, à l'époque de Döbereiner, valait 32,2, alors que celle du tellure était de 129,2 ; la moyenne, égale à 80,7, est proche de la valeur mesurée à l'époque pour le sélénium, soit 79,2.



Cette découverte avait le mérite d'établir un lien entre des propriétés chimiques qualitatives, tel le degré de réactivité, et les données numériques sur les éléments. Cela suggérait l'existence d'un ordre numérique sous-jacent reliant les éléments les uns aux autres de façon systématique.

Döbereiner découvrit d'autres triades, telles calcium-strontium-baryum ou lithium-sodium-potassium. D'autres chimistes trouvèrent des triades supplémentaires et on commença à dresser des tables afin d'établir une relation entre toutes ces triades. Certaines de ces tentatives dégénérèrent en pure numérologie, surtout lorsqu'elles négligeaient les parentés chimiques entre les éléments. Par exemple, dans son article de 1857, le chimiste allemand Ernst Lensen suggérait l'existence d'une triade constituée du silicium, du bore et du fluor, alors que ces éléments ne présentent aucune parenté chimique. Néanmoins, l'attrait de la recherche de triades encouragea les chimistes à déterminer les masses atomiques avec davantage de précision, entreprise qui rendit de précieux services à bien d'autres égards.

Un peu plus tôt, en 1815, le physicien anglais William Prout proposa un autre principe général. Dans quelques articles publiés anonymement, Prout écrivit que le fait que les masses atomiques de nombreux éléments semblent être des multiples entiers de la masse de l'hydrogène suggérait que tous les éléments étaient des composés de l'hydrogène. Cela impliquerait l'unité de la matière, affirmait-il. Certains éléments, tel l'azote qui avait alors une masse de 12,6 par rapport à l'hydrogène, semblait contredire l'hypothèse de Prout. Mais ses partisans considéraient de telles données comme des anomalies qui finirent par disparaître grâce à une détermination plus précise des masses atomiques.

Par ordre de numéro atomique

Bien que ces idées aient été fructueuses par certains aspects, elles commencèrent à montrer leurs limites quand les données plus précises sur les masses atomiques se sont accumulées. On commença à juger la notion de triade trop approximative et applicable uniquement à des groupes de trois éléments bien choisis. En outre, l'hypothèse de Prout comportait trop d'exceptions non entières. Aussi, dès la seconde moitié du XIX^{ème} siècle, les deux idées étaient réfutées.

Au début du XX^{ème} siècle, on découvrit que c'est le numéro atomique qui est le bon critère pour ordonner les éléments. Des chercheurs tels que le britannique Henry Moseley s'aperçurent qu'ils pouvaient utiliser la diffraction par rayons X pour relier le numéro atomique à la charge positive (c'est-à-dire le nombre de protons dans le noyau de chaque atome).

Le réexamen des triades et de l'hypothèse de Prout à la lumière du numéro atomique a fait revenir ces deux idées sur le devant de la scène théorique. Car, en termes de numéro atomique, les éléments ont forcément un multiple entier du nombre de protons de l'atome d'hydrogène (puisque ce dernier n'en a qu'un).

De plus, pour les triades identifiées au XIX^{ème} siècle, si l'on considère les numéros atomiques au lieu des masses atomiques, on constate que le numéro atomique de l'élément du milieu est exactement la moyenne des deux autres. Environ la moitié de toutes les triades possibles du tableau périodique moderne sont exactes en ce sens. Cependant, de nombreuses autres triades potentielles ne sont pas correctes, même approximativement : le numéro atomique de leur élément du milieu ne correspond pas du tout à la moyenne des deux autres éléments.

La raison de ce comportement est que, dans le tableau périodique, on a une répétition de la longueur de toutes les périodes (à l'exception de la première période, très courte, constituée uniquement par l'hydrogène et l'hélium). La deuxième période comporte 8 éléments (du lithium au néon) suivie d'une autre période de 8 éléments (du sodium à l'argon), suivie de deux périodes de 18 éléments, supposée suivie de deux périodes de 32 éléments, et ainsi de suite.

En conséquence de ces répétitions, les triades de numéros atomiques sont exactes dans la moitié de tous les cas possibles. Prenons l'élément chlore, par exemple. Afin de rencontrer un autre élément aux propriétés chimiques similaires, nous devons avancer de 18 cases, jusqu'au brome. Pour atteindre un troisième élément, il faut encore avancer de 18 cases, jusqu'à l'iode. Le brome se trouve exactement à mi-chemin du chlore et de l'iode en termes de numéros atomiques, précisément parce que la longueur des deux périodes entre ces deux éléments est exactement la même, soit 18 éléments. Mais dans d'autres cas



de triades potentielles, les deuxième et troisième éléments ne sont pas dans des périodes de même longueur, et les triades ne fonctionnent pas.

Au milieu du XIX^{ème} siècle, Mendeleïev, le champion incontesté du tableau périodique, était un détracteur de l'utilisation des triades et en particulier de l'hypothèse de Prout concernant l'existence de matière primaire. Mendeleïev avait la ferme conviction de l'individualité et de l'existence distincte des éléments. Il est célèbre, à raison, pour avoir laissé dans son tableau des cases vides destinées aux éléments qui n'avaient pas encore été découverts, et pour avoir prédit avec succès beaucoup de leurs propriétés, en particulier dans le cas du gallium, du germanium et du scandium.

Certains aspects du tableau de Mendeleïev sont peu connus, mais ont été néanmoins essentiels dans son approche. Mendeleïev a souligné à plusieurs reprises que le concept d'élément a un double sens. D'un côté, les éléments sont le stade final de l'analyse chimique, c'est-à-dire quelque chose qui peut être isolé et qui ne peut pas être simplifié. C'est la notion mise en avant au XVIII^{ème} siècle par Antoine Lavoisier, qui les qualifiait de « substances simples ».

Mais il y a une seconde notion, que Mendeleïev appelait parfois « éléments réels » afin d'indiquer leur statut plus fondamental. En ce sens, les éléments représentent des substances abstraites n'ayant pas ce que nous considérons normalement comme des propriétés et représentant la forme que prennent les éléments lorsqu'on les trouve dans les composés. Par exemple, le sodium et le chlore en tant que substances simples (un métal gris et un gaz verdâtre) ne sont pas littéralement présents dans le chlorure de sodium (le sel de table). Mendeleïev aurait dit que le sodium et le chlore sont présents dans le composé sous forme d'éléments abstraits ou « réels ».

Quel a été le rôle des prédictions ?

Soulignons que ces éléments abstraits sont bien réels, et devraient être considérés comme plus fondamentaux, en quelque sorte, que les substances simples que l'on peut effectivement isoler. Mendeleïev ne donnait qu'un seul attribut à l'élément abstrait, à savoir une masse atomique. C'est la masse atomique du sodium, par exemple, qui préserve l'identité du sodium quand cet élément entre dans une combinaison chimique. La classification périodique de Mendeleïev portait principalement sur les éléments abstraits, comme lui-même l'a souligné.

C'est peut-être cette vision plus philosophique des éléments qui a fait que Mendeleïev est allé plus loin que ses concurrents, lesquels focalisaient leur attention sur les éléments en tant que substances simples. Cela pourrait également expliquer comment Mendeleïev a pu contester la valeur des masses atomiques de nombreux éléments et la façon dont plusieurs éléments avaient été intégrés au tableau périodique.

On lit souvent que Mendeleïev doit en grande partie son surnom de « père du tableau périodique » au fait qu'il a prévu des éléments alors inconnus. Mais dans quelle mesure ces prédictions étaient-elles extraordinaires ? En ce qui concerne le gallium, le germanium et le silicium, elles étaient vraiment remarquables ; à tel point que Mendeleïev a même pu corriger certains des premiers résultats expérimentaux obtenus sur ces nouveaux éléments.

Cependant, si l'on considère l'ensemble des prédictions de Mendeleïev sur les nouveaux éléments, son pouvoir prédictif est moins impressionnant, pour ne pas dire un peu inquiétant. En tout, Mendeleïev a prédit 18 éléments, dont neuf seulement ont été isolés par la suite. Comment se fait-il que nous soyons disposés à pardonner à Mendeleïev autant d'erreurs ?

En outre, il n'est pas certain que des prédictions heureuses aient été décisives pour faire accepter le tableau périodique par la communauté scientifique de l'époque. Par exemple, la médaille Davy, qui était avant la création du prix Nobel la consécration suprême en chimie, a été accordée conjointement à Mendeleïev et à Julius Lothar Meyer, son principal concurrent, qui n'avait fait aucune prédiction. Et de fait, il n'est même pas fait mention des prédictions de Mendeleïev dans le discours de remise de ce prix conjoint. Il semble donc que la récompense ait été attribuée pour la façon dont les deux chimistes avaient intégré les éléments connus de l'époque dans leurs tableaux périodiques respectifs, plutôt que pour une quelconque prédiction.



La physique théorique a fourni une explication partielle de la forme et de l'existence du tableau de Mendeleïev et de ses avatars modernes. Les électrons en orbite autour du noyau sont responsables des propriétés chimiques de l'atome.

Les éléments d'une même colonne appartiennent au même groupe parce que leurs atomes ont le même nombre d'électrons sur leur couche externe. L'idée même de couches d'électrons provient de la mécanique quantique. L'énergie des électrons atomiques est quantifiée, c'est-à-dire que les électrons occupent un ensemble discret (non continu) de niveaux d'énergie appelés orbitales.

Ces niveaux d'énergie sont spécifiés par quelques nombres entiers appelés nombres quantiques. La mécanique quantique prédit ainsi que dans un atome, les principales couches successives peuvent contenir un maximum de 2, 8, 18 ou 32 électrons. La théorie est ainsi en parfait accord avec les longueurs des périodes dans le tableau périodique des éléments. Cependant, elle ne suffit pas à rendre compte de la répétition des longueurs de période, à part la première.

De fait, l'explication a continué d'échapper aux physiciens théoriciens jusque très récemment. En 2001, un physicien russe nommé Valentin Ostrovski a publié une théorie pour expliquer cet aspect des choses. Ces travaux et ceux de quelques autres chercheurs montrent que le tableau périodique, qui a pratiquement 140 années d'existence, continue à faire l'objet de recherches actives.

Un terrain fertile

Chimistes, physiciens et philosophes des sciences continuent de débattre des vertus relatives des différentes présentations du tableau périodique lui-même. Certains mettent en doute le fait qu'un tableau à deux dimensions soit le meilleur moyen d'arranger les éléments. Les chimistes affirment fréquemment qu'il n'existe pas une représentation satisfaisante à tous points de vue, et que la question de la représentation est essentiellement affaire de commodité et de convention. Cette opinion a été contestée récemment par certains philosophes des sciences, selon lesquels les disputes sur le placement de certains éléments gênants (comme l'hydrogène ou l'hélium) dans le tableau périodique ont une solution correcte, même si cette solution n'apparaît pas encore dans la science actuelle.

D'après eux, certaines représentations du tableau périodique pourraient être supérieures aux autres. Tout en ayant d'indéniables vertus, le tableau, dans sa forme classique, place l'hélium parmi les gaz inertes. Certains affirment que, malgré les apparences, on devrait placer l'hélium en tête du groupe 2, le groupe des alcalino-terreux, qui inclut le béryllium, le magnésium et le calcium : l'atome d'hélium a deux électrons sur sa couche externe, tout comme les éléments du groupe des alcalino-terreux.

De plus, le remplissage des couches électroniques suit un ordre particulier que ce regroupement représente plus naturellement. Cette forme du tableau périodique a été proposée pour la première fois par le Français Charles Janet dans les années 1920 et récemment réactivée par l'Américain Gary Katz, entre autres. Cette représentation a un avantage supplémentaire : elle donne un tableau périodique plus ordonné que la disposition classique. Dans le tableau de Janet, on a deux périodes très courtes de deux éléments, au lieu d'une seule, avec le résultat que toutes les longueurs de période, sans exception, sont répétées.

1	2																	3	4													
H	He																	Li	Be													
5	6	7	8	9	10											11	12															
B	C	N	O	F	Ne											Na	Mg															
13	14	15	16	17	18											19	20															
Al	Si	P	S	Cl	Ar											K	Ca															
												21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38			
												Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr			
												39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56			
												Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Cs	Ba			
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	Fr	Ra	
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uun	Uuu	Uub	Uuq	Uur	Uus	Uut	Uuq	Uuq	Uuq		
138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170
																								1s								
																								2s								
																								2p		3s						
																								3p		4s						



Eric Scerri a proposé récemment (2006) un autre tableau où l'hydrogène est placé tout en haut du groupe des halogènes. De plus, le groupe qui a maintenant à sa tête l'hydrogène apparaît désormais sur le bord gauche du tableau. Le principal résultat de cette manipulation est d'introduire une plus grande régularité dans la présentation du tableau périodique. Ce tableau modifié fait apparaître deux périodes de huit éléments au début et élimine complètement la très courte période de deux éléments d'aspect anormal.

H	He	Li	Be															B	C	N	O	
F	Ne	Na	Mg																Al	Si	P	S
Cl	Ar	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se					
Br	Kr	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te					
I	Xe	Cs	Ba	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po					
At	Rn	Fr	Ra	Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh					
Uus	Uuo																					
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb							
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No							

La classification selon Eric Scerri (2006)

La principale motivation derrière cette disposition est qu'elle conduit à une nouvelle triade parfaite impliquant l'hydrogène. De plus, la triade parfaite faisant intervenir l'hélium est maintenue, contrairement au tableau de Janet, où elle est perdue. Mais pourquoi devrait-on chercher une nouvelle triade parfaite ? Cette caractéristique est assez importante, car elle ne fait intervenir que le numéro atomique, le seul critère des éléments considérés comme substances simples. Comme on l'a mentionné plus haut, Mendeleïev a beaucoup insisté sur le fait que le tableau périodique était avant tout une classification des éléments comme substances de base (« éléments réels »).

A plus d'une occasion, cette vision plus philosophique des éléments a permis à la chimie de garder son identité propre et d'échapper à la mainmise de la physique. Au tout début du XX^{ème} siècle, quand on a découvert les isotopes de nombreux éléments, il sembla soudain que les « éléments » au sens des substances les plus simples que l'on puisse isoler, s'étaient multipliés. Quelques-uns des chimistes pensaient que cette prolifération marquerait la fin du tableau périodique, qui céderait sa place à un tableau des isotopes.

Cependant, certains chimistes, tels l'Autrichien Friedrich Paneth (1887–1958), ont redéfini la notion d'éléments de manière à éviter l'abandon du tableau périodique des chimistes. Paneth a fait appel à la

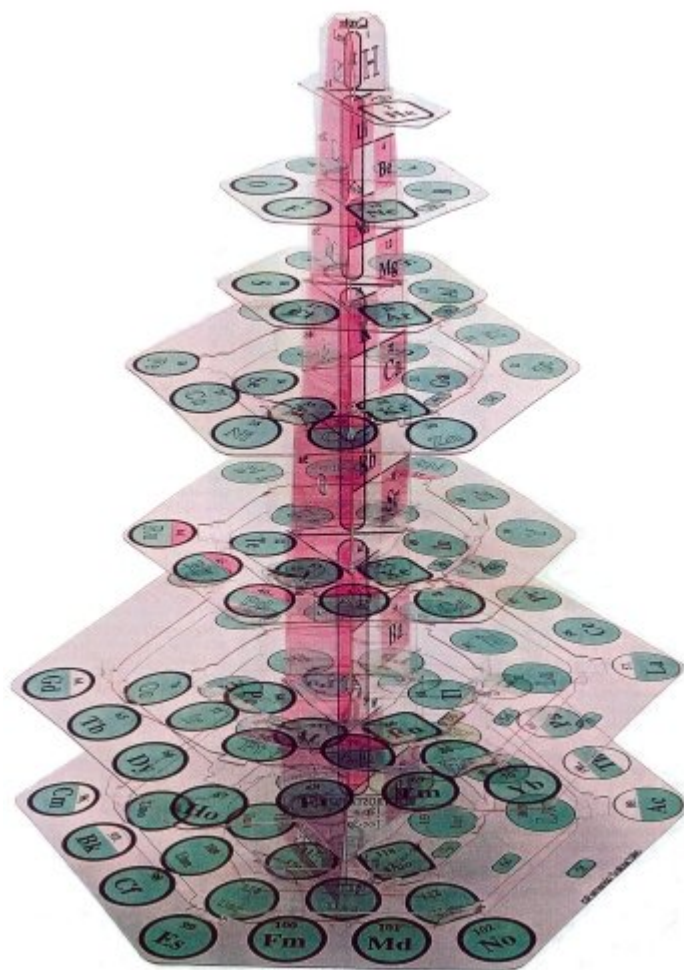


distinction que faisait Mendeleïev entre les « éléments réels » et les éléments considérés comme substances simples. En caractérisant les « éléments réels » par leur numéro atomique, le chimiste pouvait ignorer le fait que les « éléments » ont des centaines d'isotopes. Les isotopes, eux, pouvaient être considérés comme des « substances simples ». Cette approche trouvait une justification supplémentaire dans le fait que les isotopes d'un même élément ont en général des propriétés chimiques identiques.

De deux à trois dimensions ?

Le développement le plus radical dans les recherches modernes sur le tableau périodique a peut-être été la remise en cause d'une présentation bidimensionnelle. Au moins trois tableaux périodiques en trois dimensions ont été développés et commercialisés avec succès à titre de matériel pédagogique. Dans certains cas, comme avec l'Elemen-Tree (jeu de mot tout britannique entre « arbre des éléments » et « élémentaire ») du chimiste canadien Fernando Dufour, ces tableaux servent aussi à souligner les ressemblances chimiques qui n'apparaissent pas dans le tableau classique à deux dimensions.

Par exemple, les éléments du groupe 13 du tableau classique, tels le bore, l'aluminium et le gallium, présentent tous une valence de trois. Cependant, d'autres éléments présentent aussi cette propriété, notamment les éléments du groupe 3 du tableau classique, parmi lesquels le scandium, l'yttrium et le lutécium. Dans le système de Dufour, tous ces éléments se retrouvent dans un même plan, qui peut être imaginé comme une tranche dans le système de classification tridimensionnel.



Un autre agencement relancé et défendu par Philip Stewart, de l'Université d'Oxford, est le système périodique en spirale. Comme il l'argumente lui-même, le tableau classique ne parvient pas à faire



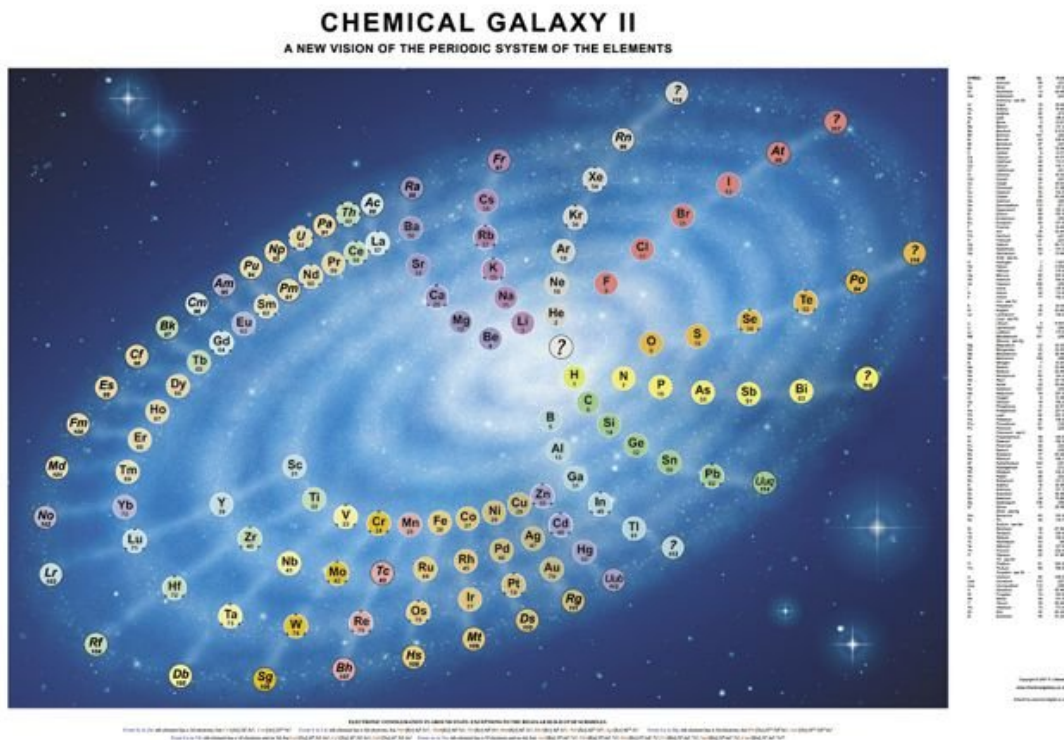
ressortir la continuité de la séquence des éléments. Les systèmes en spirale soulignent cette continuité, alors que le tableau classique suggère une rupture entre les gaz inertes du bord droit du tableau et les métaux alcalins du bord gauche.

L'hypothèse de la spirale

Notre attachement aux formes bidimensionnelles du tableau serait-il dû à la prédominance de la surface plane des pages des manuels et des murs de salles de cours ? Un système à trois dimensions n'est pas facile à intégrer à un livre ou à exposer sur un mur. Mais avec l'essor des nouvelles technologies du XXI^{ème} siècle, la célèbre icône de Mendeleïev sera peut-être transformée en quelque chose que lui-même n'aurait pas reconnu s'il était encore là pour le voir.

En fait, en ce qui concerne les formes spirales, Mendeleïev avait envisagé une telle disposition sans parvenir à une version concluante. Comme l'a noté Stewart, si Mendeleïev avait accordé davantage d'attention aux formes en spirale, il aurait pu aussi prédire l'existence de la famille toute entière des gaz inertes. Car si l'on utilise une disposition en spirale des éléments, l'existence possible des gaz rares devient assez évidente, comme l'avait remarqué le chimiste Anglais William Crookes il y a plus d'un siècle.

Le tableau périodique a germé avec l'identification de triades d'éléments et s'est développé à l'époque de l'hypothèse de Prout sur l'unité de la matière. A partir de ces origines numériques et philosophiques, il a évolué en un outil formidablement pratique, utilisé non seulement par les chimistes, mais par tous les chercheurs et ingénieurs. Toutefois, ses aspects philosophiques n'ont pas été totalement éclipsés et, comme nous l'avons vu ici, ils continuent à sous-tendre le tableau périodique et réémergent parfois pour aider à répondre aux questions pratiques relatives à son identité et à sa représentation graphique.



Eric Scerri, *The Periodic table : its story and signifiacnce*, Oxford University Press, 2007.