

L'ESSENTIEL

- La découverte de l'élément 117 a permis de compléter le tableau périodique.
- Certains éléments lourds diffèrent par leur comportement chimique des éléments situés dans la même colonne, dérogeant aux principes d'organisation du tableau.
- Ces divergences seraient dues à des effets décrits par la théorie de la relativité restreinte et portant sur les électrons de l'atome.
- Les physiciens nucléaires étudient les propriétés des éléments les plus lourds du tableau pour comprendre ces effets.

LE TABLEAU PÉRIODIQUE COMPLET

semble marquer la réussite du projet de Mendeleïev et confirmer le principe de périodicité. Mais la théorie de la relativité restreinte vient noircir... le tableau.

calculs pour prévoir exactement les effets relativistes des électrons d'un atome sont complexes et l'étude de chaque élément requiert l'expérimentation. Ainsi, malgré le succès du tableau de Mendeleïev enfin rempli, sa puissance de prédiction semble avoir atteint une limite.

Il existe plus de 1000 versions du tableau périodique avec des variantes dans l'arrangement des éléments, mais toutes partagent une caractéristique essentielle. Quand on dispose les éléments séquentiellement, dans l'ordre du numéro atomique, leurs propriétés chimiques tendent à se répéter de façon périodique. Par exemple, si nous partons du lithium et que nous avançons de huit cases, nous arrivons au sodium. Ces éléments ont de nombreuses caractéristiques communes. Tous deux sont des métaux assez mous pour être coupés avec un couteau, et tous deux réagissent vivement avec l'eau. Et si nous avançons encore de huit cases, nous atteignons le potassium, qui est aussi un métal mou et réagit avec l'eau.

Dans les tout premiers tableaux périodiques, incluant ceux conçus par Mendeleïev, la longueur de chaque période – et donc la longueur de chaque rangée (ou ligne) – était toujours de huit. Le tableau était agencé pour avoir, par exemple, le lithium, le sodium et le potassium dans la même colonne. Bientôt, cependant, on découvrit que les quatrième et cinquième périodes ne se répètent pas après huit éléments, mais après 18. En conséquence, les quatrième et cinquième rangées du tableau sont plus larges que les précédentes afin de recevoir le bloc supplémentaire d'éléments (les métaux de transition, qui se trouvent au milieu du tableau périodique dans la version usuelle).

La sixième période se révéla être encore plus longue, contenant 32 éléments, en raison de l'inclusion d'une nouvelle série de 14 éléments. Ceux-ci forment avec le lutécium la famille des lanthanides (qui appartiennent aux terres rares).

À partir de 1937, les physiciens nucléaires ont commencé à synthétiser de nouveaux éléments, en commençant par le technétium. Celui-ci venait combler l'une des quatre lacunes du tableau périodique connu alors, qui allait de 1 (l'hydrogène) à 92 (l'uranium). Les trois autres pièces

manquantes suivirent peu après ; deux d'entre elles ont été synthétisées (l'astate et le prométhium) et la troisième a été découverte dans la nature (le francium). Mais alors même que ces lacunes étaient comblées, de nouvelles découvertes ajoutaient des éléments au-delà de l'uranium, laissant de nouvelles cases vides dans le tableau périodique.

Le chimiste américain Glenn Seaborg remarqua que l'actinium, le thorium, le protactinium, l'uranium et les dix éléments suivants faisaient partie d'une nouvelle série, qui comportait 14 éléments. Avec le lawrencium, on les nomme les actinides.

Au cours de la première moitié du XX^e siècle, les physiciens et les chimistes ont compris que la périodicité des éléments trouve son origine dans la physique quantique et, en particulier, dans la physique des électrons en orbite autour du noyau. Ces orbites, ou « orbitales », ne ressemblent pas à celles des planètes, qui décrivent des ellipses autour du Soleil. Elles correspondent à des régions de l'espace autour du noyau où il est possible de localiser l'électron lors d'une mesure. Elles se présentent sous différentes formes et tailles (voir l'encadré page ci-contre).

Les atomes de numéros atomiques élevés ont les mêmes types d'orbitales que ceux de numéros inférieurs, mais s'y ajoutent de nouveaux types d'orbitales. Les éléments de la première période ont uniquement une orbitale, de type noté *s*, qui peut être occupée par un ou deux électrons (un pour l'hydrogène, deux pour l'hélium). Pour les éléments des deuxième et troisième périodes s'ajoutent une autre orbitale de type *s* et trois orbitales d'une nouvelle sorte, notée *p*. Chacune de ces quatre orbitales peut être occupée par un ou deux électrons, pour un potentiel total de huit électrons – d'où la périodicité de huit dans les versions originales de la classification périodique. Les quatrième et cinquième périodes ont, en plus des types *s* et *p*, un troisième type d'orbitale, noté *d*, qui ajoute dix places supplémentaires pour les électrons et, par conséquent, étend les périodes à 18. Enfin, les deux derniers cycles ont des orbitales de types *s*, *p*, *d* et *f*, et ont une longueur de 32 éléments (18 + 14).

Quand Yuri Oganessian et ses collaborateurs à l'Institut unifié de physique nucléaire, à Doubna, près de Moscou, ont annoncé qu'ils avaient synthétisé « l'insaisissable » élément 117, tous les éléments de

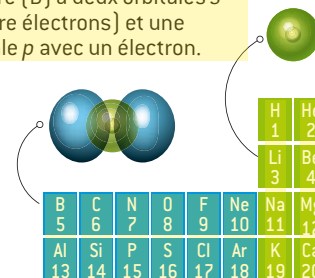
Le tableau périodique classe les éléments chimiques en fonction de leurs propriétés chimiques récurrentes. Celles-ci sont déterminées par les orbites des électrons d'un atome autour de son noyau, ou « orbitales » – en particulier par les orbitales les plus externes. En allant des numéros atomiques les plus bas aux plus élevés, la structure des orbitales externes change d'une façon périodique. Par exemple, les éléments 5 à 10 ont des orbitales externes de type *p*, tout comme les éléments 13 à 18. Tous ces éléments appartiennent au même « bloc *p* » (en bleu).

Un nouvel élément, un nouveau bloc

Cette version du tableau périodique est nommée le « tableau en escalier de Janet », d'après le Français Charles Janet (1849-1932), ingénieur, inventeur, chimiste, entomologiste, etc. ! Ce tableau conserve les colonnes du tableau classique et met en évidence la régularité des orbitales et leur remplissage. Les orbitales externes des éléments 119 et 120 seront de type *s*. L'élément 121 sera le premier à avoir des orbitales appartenant à une nouvelle famille, de type *g*.

Exemples de structures :

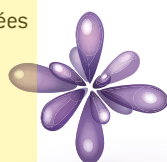
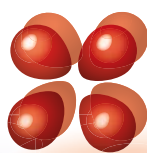
le lithium (Li) a deux orbitales s qui contiennent au total trois électrons (non représentés). Le bore (B) a deux orbitales s (quatre électrons) et une orbitale p avec un électron.



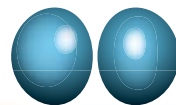
Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36	Rb 37	Sr 38
Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54	Cs 55	Ba 56
Lu 71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86	Fr 87	Ra 88
	Rf 103	Db 104	Sg 105	Bh 106	Hs 107	Mt 108	Rg 109	Cn 110	Uut 111	Fl 112	Uup 113	Uuq 114	Uus 115	Uuh 116	Uuo 117	Uu1 118	Uu2 119

[illegible]

Toutes les deux périodes, et donc toutes les deux rangées du tableau périodique, une nouvelle famille d'orbitales électroniques apparaît. Les formes des orbitales indiquent où l'électron a la probabilité la plus élevée de se trouver.

Orbitale g 

Orbitale f

Orbitale d Orbitale p 

Orbitale s

la dernière ligne du tableau se trouvaient désormais en place. La relation entre la structure du tableau périodique et celle des atomes montre bien que ce tableau n'est pas simplement une affaire d'esthétique ou d'organisation de l'information sur le papier. L'élément 118, le dernier du tableau, a ainsi toutes ses orbitales s , p , d et f remplies par des électrons.

Si de nouveaux éléments sont synthétisés, il faudra ajouter une rangée de plus au tableau périodique. L'élément 119, probablement le suivant à apparaître sur la liste, devrait amorcer un nouveau cycle – avec à nouveau le type le plus simple d'orbitales, l'orbitale *s*. Les éléments 119 et 120 devraient occuper les deux premières cases de la huitième période. Mais avec l'élément 121, un bloc totalement nouveau serait nécessaire. Il mettrait en jeu des orbitales jamais rencontrées auparavant : les orbitales *g*. Ce nouveau type d'orbitales ajoute des possibilités pour les électrons et

■ L'AUTEUR



Eric SCERRI
est historien
et philosophe
de la chimie
à l'Université
de Californie
à Los Angeles, aux États-Unis.

donc allonge la période, ce qui augmente le nombre de colonnes dans le tableau. Ce bloc d'éléments devrait porter à 50 le nombre de colonnes du tableau.

Mais avant de devoir ajouter une nouvelle période au tableau, les chimistes rencontrent un autre type de difficulté. Le tableau périodique complet – c'est-à-dire avec toutes ses rangées connues remplies – semble marquer la réussite du projet de Mendeleïev et confirmer le principe de périodicité. Mais la théorie de la relativité restreinte due à Albert Einstein vient noircir... le tableau.

Des électrons relativistes

La charge électrique du noyau atomique, due aux protons, augmente avec le numéro atomique. Plus cette charge est importante, plus les électrons des orbitales internes ont une vitesse élevée. Pour les noyaux lourds, la théorie de la relativité restreinte joue alors un

rôle notable. La taille des orbitales internes se réduit et leur stabilité augmente – l'énergie de ces orbitales diminue, ce qui a des répercussions sur les autres orbitales *s* et *p*. Ces dernières se rapprochent aussi du noyau, y compris les orbitales de « valence », les plus externes, qui régissent les propriétés chimiques de l'atome.

Tous ces phénomènes sont connus sous le nom d'effet relativiste direct, qui augmente en général avec la charge électrique du noyau. Certains effets concurrents compliquent la situation. Alors que l'effet relativiste direct stabilise certaines orbitales, un autre effet, l'effet relativiste indirect, déstabilise les orbitales *d* et *f*. Le phénomène est une sorte d'effet écran électrostatique dû aux électrons *s* et *p*. La charge électrique négative de ces électrons masque en partie la charge positive du noyau dont l'action s'exerce sur les lointains électrons *d* et *f*. Ces derniers sont alors moins liés au noyau, donc plus instables.

Certains effets relativistes à l'œuvre dans les éléments chimiques se manifestent dans la vie quotidienne. Par exemple, ils expliquent la couleur de l'or, qui se distingue des éléments incolores qui l'entourent dans le bloc d'orbitales *d* du tableau périodique – en particulier l'argent, qui se trouve juste au-dessus de l'or dans le tableau.

Quand un atome d'un métal du bloc *d* est frappé par un photon dont la longueur d'onde est adéquate, il subit une transition électronique. Un électron d'une orbitale *d* absorbe le photon et passe dans un

état d'énergie plus élevé correspondant à une orbitale *s* supérieure. Dans le cas de l'argent, l'écart d'énergie entre les deux orbitales est assez grand, de sorte qu'il faut un photon de la région ultraviolette du spectre électromagnétique pour déclencher la transition. Des photons de lumière visible, dont l'énergie est inférieure, sont réfléchis ; c'est pourquoi ce matériau semble être un miroir.

Dans le cas de l'or, la contraction relativiste abaisse l'énergie des orbitales *s*, tout en augmentant l'énergie des orbitales *d*, réduisant ainsi l'écart entre ces deux niveaux. La transition requiert alors moins d'énergie – elle correspond à celle d'un photon de la partie bleue du spectre. Tandis que le bleu est absorbé, les photons des autres couleurs sont réfléchis – d'où la couleur jaune doré caractéristique de l'or.

Pekka Pyykkö, de l'Université d'Helsinki, et d'autres ont répertorié de nombreux comportements de l'or liés aux effets relativistes, en particulier des liaisons inattendues entre l'or et d'autres éléments. Les composés qui, selon eux, devaient résulter de telles interactions ont été découverts par la suite. Cette prouesse rappelle les exploits de Mendeleïev, qui avait prévu l'existence de nouveaux éléments. Parmi les prévisions couronnées de succès de P. Pyykkö figuraient des liaisons entre l'or et le xénon – « gaz rare » qui est extrêmement inerte – et des liaisons triples entre l'or et le carbone. Un autre succès était une molécule sphérique impliquant un

atome de tungstène et 12 atomes d'or et ressemblant aux fullerènes de carbone, avec leur structure en ballon de football. Ce fullerène d'or se forme spontanément quand le tungstène et l'or sont vaporisés en présence d'hélium.

Les calculs de mécanique quantique relativiste se sont aussi révélés indispensables pour étudier comment des dépôts d'or peuvent agir comme catalyseurs, bien que l'or soit relativement inerte. Par exemple, cet élément peut décomposer des substances toxiques contenues dans les gaz d'échappement des automobiles.

Des surprises superlourdes

Même avec l'apparition d'effets relativistes, les éléments comme l'or s'écartent peu des caractéristiques attendues. La plupart des éléments dérogent peu au principe de périodicité et leurs propriétés s'accordent avec leur position dans le tableau périodique. Mais il y a eu des surprises. Certaines expériences sur la chimie des éléments les plus récemment découverts ont commencé à montrer qu'il pourrait bien y avoir de sérieuses failles dans le tableau périodique.

En utilisant des accélérateurs de particules pour faire entrer en collision des noyaux lourds, les physiciens nucléaires sont capables de produire des éléments « superlourds » – ceux qui se trouvent au-delà du numéro atomique 103. Les pre-

SPIRAL 2, une usine à éléments superlourds

La recherche de noyaux dits superlourds est un important champ d'étude en physique nucléaire. En synthétisant ces nouveaux noyaux très exotiques, on espère notamment cerner la limite de la stabilité nucléaire et tester jusqu'où va la validité du principe de périodicité du tableau de Mendeleïev.

Depuis plusieurs décennies, les chercheurs français ont contribué à cette recherche des éléments superlourds par différents biais. En 1970, à Orsay, avec le premier accélérateur complexe d'ions lourds, ALICE, une équipe a recherché l'élément 126 qui correspondait au noyau « magique » succédant à l'isotope 208 du plomb (82 protons et 126 neutrons). Les noyaux magiques sont particulièrement stables. Les mo-

dèles théoriques permettent de prévoir leurs nombres de protons et de neutrons. La découverte de noyaux magiques et d'« îlots » de stabilité (des groupements d'éléments stables dans le diagramme où les axes sont les nombres de protons et de neutrons) aide à préciser les modèles.

À cette époque, une collaboration franco-russe très active s'est orientée vers l'étude chimique des éléments superlourds et des actinides à partir de quelques atomes produits, en développant des méthodes de séparation et d'identification des produits de désintégration des éléments 104 à 109.

Les chercheurs français ont poursuivi les études des éléments superlourds avec les accélérateurs de Dub-

na en Russie et ceux du GANIL (Grand accélérateur national d'ions lourds), à Caen, pour comprendre leur structure, mettre en évidence des caractéristiques telles que leur durée de vie et explorer de nouvelles voies de synthèse... Mais le petit nombre d'atomes produits est un obstacle à leur étude.

À partir de 2015, le GANIL se dotera d'une nouvelle installation, SPIRAL 2. Les faisceaux de noyaux y auront une intensité au mieux 10 fois supérieure. Il sera possible de synthétiser et d'observer les éléments superlourds en grande quantité et avec un temps d'expérience réduit et raisonnable (d'une semaine à un mois). Une équipe internationale de physiciens nucléaires participe au déve-

loppement technique des détecteurs, des cibles pour les faisceaux et d'un spectromètre qui permettra d'identifier les événements rares impliquant des éléments superlourds.

Les expériences apporteront des réponses plus précises sur la localisation du prochain îlot de stabilité et sur la structure des noyaux superlourds. La découverte récente de l'élément 117 par l'équipe de Y. Oganessian pourrait être confirmée par une expérience indépendante. Une façon de procéder passerait par la détection d'un isotope de l'élément 115 obtenu par la désintégration du 117.

Christelle Stodel
Chargée de recherche CNRS
GANIL, Caen