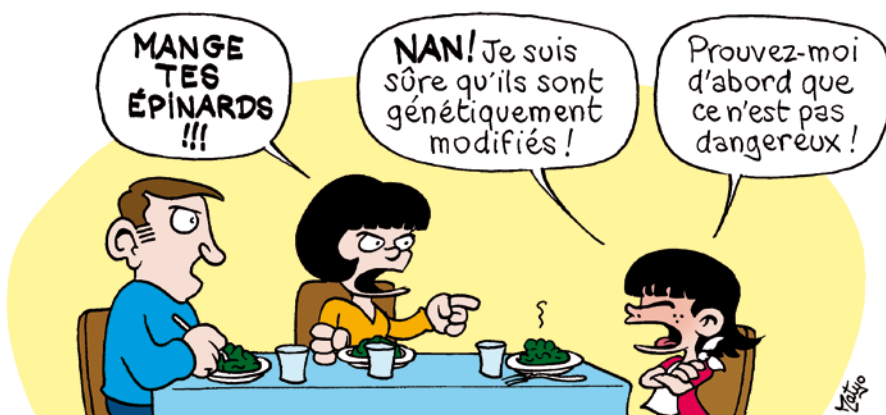




LA CHRONIQUE DE
VIRGINIE TOURNAY

LE JOUR SANS FIN DES OGM

Dans le contexte agricole, les organismes génétiquement modifiés font l'objet d'une suspicion *a priori*. Dès lors, établir la non-toxicité d'un OGM devient impossible.



Voyager dans le temps est un thème de fiction populaire. Nous avons tous en mémoire le film *Un jour sans fin*, où le personnage joué par Bill Murray, coincé dans une boucle temporelle, est contraint à revivre sans cesse la même journée. Or l'histoire sociale des organismes génétiquement modifiés (OGM) nous projette dans une version éprouvante d'un tel jour sans fin. À chaque coup d'éclat médiatique, la suspicion du public à l'égard des OGM se renouvelle, voire se renforce.

Même si les enjeux socioéconomiques font des OGM une question politique, la défiance à leur égard reste alimentée par un sensationnalisme médiatico-scientifique. «Oui, les OGM sont des poisons!», titrait la une du *Nouvel Observateur* en septembre 2012, au moment de la publication des expériences de Gilles-Éric Séralini, de l'université de Caen, sur la toxicité chez les rats d'un maïs OGM résistant au glyphosate.

Cette affaire constitue un excellent modèle sociologique pour saisir les

ressorts de la confiance. Le public se souvient des photographies de rats envahis de tumeurs géantes et des gros titres des journaux à ce sujet. Mais il ne se souvient guère des travaux des agences de régulation qui ont, peu de temps après, invalidé l'étude de Gilles-Éric Séralini en raison de sérieux biais méthodologiques. Ni, probablement, que plusieurs études fiables et récentes (la dernière étant parue le 10 décembre 2018

Confiance sociale et preuve scientifique n'évoluent pas conjointement

dans *Toxicological Sciences*, doi:10.1093/toxsci/kfy298) ont confirmé l'absence d'effets de ce maïs sur la santé.

La défiance est toujours là, ce qui illustre que confiance sociale et preuve scientifique n'évoluent pas conjointement. Le faible intérêt pour les nouvelles

«tranquillisantes» et les trains qui arrivent à l'heure ne suffit pas à expliquer l'irréductibilité de cette défiance. Pour en comprendre les mécanismes, il faut remonter à la découverte des ciseaux moléculaires de l'ADN que sont les enzymes de restriction, cheville ouvrière du génie génétique. Les produits résultant d'une découpe de l'ADN ont alors été qualifiés de génétiquement modifiés. Le ver de la défiance se situe dans le fruit de ce baptême terminologique.

En effet, dans les années 1970, la génétique moléculaire décrivait la séquence d'ADN comme le composant élémentaire et suffisant des organismes vivants. Or malgré le fait que les recherches ultérieures ont montré que l'ADN est loin de déterminer à lui seul le vivant, les représentations populaires du génie génétique et son encadrement réglementaire sont restés arrimés à ce paradigme simplificateur.

Les outils du génie génétique sont porteurs d'espoir quand ils fournissent des thérapies géniques ou des médicaments, mais l'ordre du vivant apparaît bouleversé dans l'imaginaire collectif lorsqu'ils concernent les cultures agricoles. Ces productions d'OGM sont suspectées *a priori*, avant qu'une évaluation scientifique fondée sur des indices biologiques probants établisse une éventuelle toxicité ou un impact environnemental.

Or cette suspicion *a priori* est redoutable, car elle touche une limite épistémologique dans l'établissement de la preuve. Étant donné cet *a priori*, prouver qu'une substance n'est pas toxique exigerait une régression à l'infini: il faudrait envisager chaque situation où la substance serait potentiellement toxique sur une durée indéterminée, ce qui est bien sûr impossible. Les OGM sont ainsi condamnés à rejouer ce jour sans fin où une preuve de non-toxicité p_n dépend d'une non-toxicité p_{n+1} – sauf à sortir de cette économie de la preuve et à soumettre les OGM à une évaluation au cas par cas, sur la base d'indices probants. Autrement dit, les OGM doivent être culturellement modifiés. ■

VIRGINIE TOURNAY, biologiste de formation, est politologue et directrice de recherche du CNRS au Cevipof, à Sciences Po, à Paris.

L'ESSENTIEL

> Les physiciens cherchent à produire des atomes aux noyaux plus lourds que ceux des éléments connus.

> Les noyaux superlourds produits à ce jour ont une durée de vie extrêmement courte.

> Mais en théorie, certains noyaux superlourds combinant

les bons nombres de protons et de neutrons pourraient être beaucoup plus stables.

> Ils représenteraient un « îlot de stabilité » dans le tableau périodique des éléments. Les chercheurs voient dans certains des éléments récemment produits les rivages de cet îlot.

LES AUTEURS



CHRISTOPH E. DÜLLMANN
chimiste nucléaire
à l'université
Johannes-Gutenberg
de Mayence, en Allemagne



MICHAEL BLOCK
physicien nucléaire au GSI
(centre Helmholtz de
recherche sur les ions lourds),
à Darmstadt, en Allemagne

La course aux éléments superlourds

Plusieurs équipes de physiciens se livrent une course effrénée pour produire les noyaux atomiques les plus lourds qui puissent exister. Leur objectif : être les premiers à planter leur drapeau sur le fameux « îlot de stabilité », région du tableau périodique qui grouperait des éléments superlourds et cependant non éphémères.



Si vous pouviez tenir un seul atome dans votre main, lequel serait le plus lourd? **Réponse: l'oganesson.** Son noyau dense renferme le nombre record de 118 protons. Par contraste, l'hydrogène, l'élément le plus léger et le plus répandu dans l'Univers (présent dans vos cellules, les océans de la Terre et l'atmosphère de Jupiter) n'en contient qu'un.

La découverte de l'oganesson a été annoncée en 2006. Les physiciens avaient utilisé un accélérateur de particules situé à Doubna, en Russie, pour bombarder une cible d'atomes lourds avec des millions de milliards d'ions calcium à chaque seconde. Au terme d'un total de 1 080 heures de collisions, les chercheurs avaient produit trois noyaux atomiques (un en 2002, deux autres en 2005) de cette nouvelle substance superlourde.

Ces nouveaux noyaux atomiques n'ont survécu qu'une poignée de millisecondes. Avec une durée de vie aussi brève, comment être certain de la réalité de la découverte? En fait, les physiciens de l'Institut unifié de recherches nucléaires (IURN) de Doubna ont procédé à un décompte minutieux du rayonnement et des noyaux plus petits émis lors des désintégrations. Cela leur a permis d'acquiescer la quasi-certitude qu'ils avaient, l'espace d'un instant, créé le fameux élément. En 2015, après une décennie de vérifications en tous genres, l'élément 118 a officiellement rejoint le tableau périodique des éléments, c'est-à-dire la liste de référence des éléments qui constituent la matière. Il a été baptisé en l'honneur d'Iouri Oganessian, un pionnier de ces recherches à l'institut.

La découverte russe de l'oganesson est loin d'être le dernier épisode de cette histoire. Au cours de la dernière décennie, les chercheurs ont en effet repoussé plusieurs fois les marges du tableau périodique des éléments pour y inclure de nouveaux atomes toujours plus lourds. En même temps que l'oganesson était officialisé, les chercheurs ont également ajouté au tableau périodique des éléments contenant 113, 115 et 117 protons par atome (la nature chimique d'un élément est définie par le nombre de protons que contient le noyau de ses atomes). L'un de nous (Christoph Düllmann) a même pu réaliser des expériences de chimie sur plusieurs de ces éléments superlourds.

Cette exploration d'un monde inconnu est passionnante, mais les physiciens et les chimistes se heurtent à un problème de taille: les quelques atomes qu'ils forgent n'existent que quelques brefs instants avant de s'évanouir ou de se transformer. Et ce en raison de la répulsion entre protons: chargés positivement, ils se repoussent mutuellement et sont si

nombreux que les tensions internes finissent par l'emporter et déchirer la matière du noyau. Pour autant, les physiciens ne désespèrent pas, car il se pourrait que cette malédiction frappant les atomes superlourds soit levée pour certains d'entre eux et leurs isotopes (des versions du même élément où le noyau atomique recèle un nombre différent de neutrons).

Ces «survivants» du monde atomique, qui restent à découvrir, pourraient se maintenir pendant quelques minutes, voire quelques années, sans se désintégrer. Ensemble, ils constitueraient une région du tableau périodique qui fait depuis longtemps l'objet de spéculations: l'îlot de stabilité. Grâce à des configurations particulières du noyau qui leur confèreraient une stabilité inhabituelle, les éléments superlourds de cette région ne seraient plus de simples productions éphémères de laboratoire, mais pourraient résister au temps.

Avec les récentes découvertes d'atomes superlourds, les physiciens ont peut-être déjà entrevu les rivages de cet îlot. Prenez l'élément 114, par exemple. Dans un accélérateur, cet atome à 114 protons s'est désintégré un peu moins rapidement que ne le prédisaient les calculs. Quant à la demi-vie (c'est-à-dire le temps au bout duquel la moitié des atomes se sont désintégrés en un autre élément) d'autres éléments lourds récemment identifiés, on a constaté qu'elle s'allonge à mesure qu'augmente le nombre de neutrons dans le noyau.

UN ÎLOT OÙ LA DURÉE DE VIE EST RELATIVEMENT LONGUE

Même si cette durée de vie demeure encore brève, c'est un signe irréfutable que les physiciens s'approchent de la terre promise. De fait, ces observations concordent avec les prédictions: l'îlot de stabilité est censé se trouver dans la zone du tableau périodique où les atomes ont environ 114 protons et au moins autant de neutrons.

Maintenant que nous avons commencé à explorer cet îlot de stabilité, nous espérons en tracer les contours, déterminer son cœur (là où se concentrent les isotopes les plus stables) et découvrir combien de temps ces atomes peuvent subsister.

Il ne s'agit pas seulement d'ajouter quelques briques supplémentaires au grand lego de la nature. Car si nous étions un jour capables d'en fabriquer un kilogramme, ces éléments pourraient avoir des propriétés totalement inédites (et potentiellement utiles) qui les distingueraient de tous les matériaux connus. Et même si les substances que nous créons s'obstinent à se désintégrer beaucoup trop vite pour que nous puissions un jour les tenir entre nos mains, nous aurons avancé d'un pas vers une compréhension plus profonde de la chimie et de la nature fondamentale de la matière. ➤

LE TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

Ce tableau essentiel de la chimie, appelé aussi tableau de Mendeleïev, présente tous les éléments connus en fonction du nombre de protons qui composent leurs noyaux atomiques. Les chercheurs tentent de le compléter avec des éléments plus lourds, c'est-à-dire dont le noyau atomique contient davantage de protons. Ils ont ainsi produit en laboratoire des noyaux « superlourds » (en rose). Ces noyaux sont trop instables pour exister à l'état naturel : ils se désintègrent très vite après s'être formés.

Numéro atomique
(nombre de protons
du noyau de l'atome)

H 1		le noyau atomique contient davantage de protons. Ils ont ainsi produit en laboratoire des noyaux « superlourds » (en rose). Ces noyaux sont trop instables pour exister à l'état naturel : ils se désintègrent très vite après s'être formés.										He 2					
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
K 19	Ca 20	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	* 57-71	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	** 89-103	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110	Rg 111	Cn 112	Nh 113	Fl 114	Mc 115	Lv 116	Ts 117	Og 118

119 120

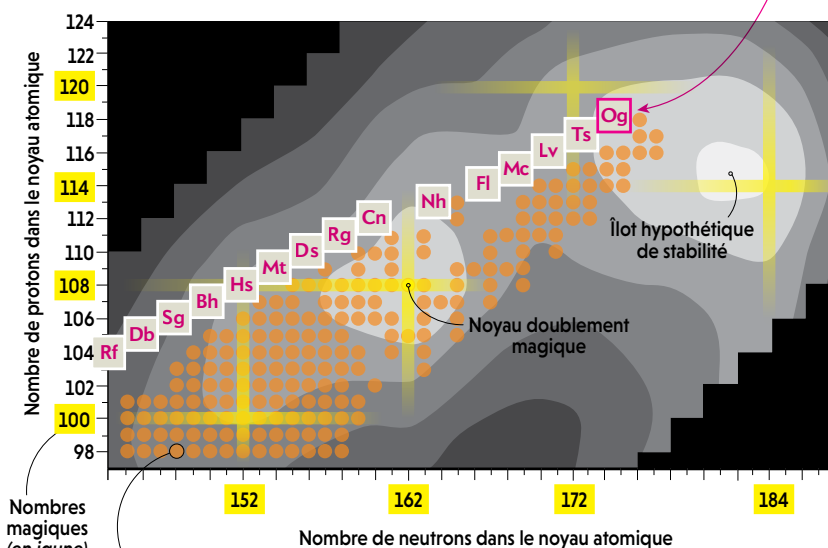
Positions hypothétiques des éléments * de numéros atomiques 119 et 120, non détectés à ce jour

Les lanthanides (*) et les actinides (**) sont regroupés à part du corps principal du tableau en raison de leurs propriétés chimiques similaires.

La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71
Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103

L'ÎLOT DE STABILITÉ

Comme chaque proton d'un noyau est une charge positive qui repousse les autres protons, plus un noyau en contient, plus il risque de se désintégrer. Mais les physiciens pensent qu'un groupe de noyaux superlourds, qui restent à découvrir, pourraient être néanmoins stables grâce à une configuration particulière de leurs protons et neutrons. Selon un modèle théorique efficace, ces particules occupent des « couches » pouvant en contenir chacune un nombre maximal donné. Une couche est de stabilité maximale quand elle est complètement remplie, et c'est pourquoi les nombres de protons ou de neutrons pour lesquels les couches occupées sont remplies sont qualifiés de nombres magiques. Quand le nombre de protons et celui de neutrons sont tous deux magiques, on parle de noyau doublement magique. La théorie suggère par exemple qu'un noyau composé de 114 protons et 184 neutrons serait doublement magique, mais les scientifiques n'ont pas encore obtenu de tels noyaux atomiques. On pense que s'ils y parvenaient, ces noyaux pourraient faire partie d'un « îlot de stabilité » regroupant des noyaux superlourds moins éphémères que les autres.



Les points orange représentent des noyaux produits en laboratoire

Les différents niveaux de gris indiquent la probabilité que la zone fasse partie de l'îlot de stabilité (probabilité plus faible pour les régions sombres, probabilité plus élevée pour les régions claires)

> Le tableau périodique est une manière pour les chimistes de cartographier le monde atomique. Il a été conçu au XIX^e siècle par le chimiste russe Dmitri Mendeleïev (mais aussi, indépendamment, par le chimiste allemand Julius Lothar Meyer). Il liste les éléments dans l'ordre de leur numéro atomique (qui correspond au nombre de protons que contient le noyau atomique) et les place dans des colonnes en fonction de leur réactivité chimique, c'est-à-dire de la façon dont ils réagissent avec d'autres atomes pour former des molécules.

À peine le tableau formulé, les chimistes ont commencé à se demander jusqu'où il s'étendait. L'élément le plus lourd trouvé dans la nature en quantités notables est l'uranium, dont le noyau contient 92 protons. Au-delà de ce nombre, chaque proton supplémentaire déstabilise le noyau : la répulsion électrostatique entre les protons (des charges positives) dépasse l'attraction due à l'interaction nucléaire – l'« interaction forte » – qui assure la cohésion du noyau atomique, et celui-ci se scinde ; c'est la fission du noyau.

La stabilité d'un élément donné ne se résume toutefois pas au nombre de protons qu'il renferme ; elle dépend aussi de l'organisation des protons et des neutrons dans le noyau atomique. Selon le modèle en couches du noyau développé à la fin des années 1940 par la Germano-américaine Maria Goeppert-Mayer et l'Allemand Hans Daniel Jensen (lauréats du prix Nobel en 1963), les deux types de particules remplissent ce qu'on appelle des couches nucléaires. Ces couches peuvent accueillir des nombres particuliers de protons et de neutrons, et sont analogues aux couches électroniques qui contiennent les électrons autour du noyau. Dans les deux cas, des couches complètement remplies garantissent une plus grande cohésion et assurent une meilleure stabilité.

PROTONS ET NEUTRONS : DES NOMBRES MAGIQUES...

Les physiciens ont conçu le modèle en couches quand ils se sont rendu compte que pour certains nombres « magiques » de protons ou de neutrons (2, 8, 20, 28, 50 et 82), les noyaux sont plus stables et plus difficiles à casser. Dans le modèle en couches, ces nombres magiques correspondent à des couches pleines. Les nombres magiques de protons et ceux de neutrons sont les mêmes, mais rien ne garantit qu'ils continueront à correspondre dans les futurs atomes que nous produirons. Un noyau dans lequel à la fois les couches de protons et celles de neutrons sont complètes est considéré comme « doublement magique ».

Nous sommes encore loin d'avoir percé tous les mystères des nombres magiques. Quels seront les nombres magiques des

noyaux qui restent à découvrir ?, s'interrogent par exemple les physiciens. Selon certaines prédictions théoriques, un noyau superlourd comportant 114 protons et 184 neutrons serait doublement magique. Mais ce noyau demeure une vue de l'esprit : si nous avons produit l'élément 114 (nommé flerovium) en laboratoire, nous n'en avons pas encore obtenu une version à 184 neutrons. Or on prévoit qu'un tel isotope soit tellement stable que sa demi-vie approcherait l'âge de la Terre. Ce résultat théorique date des années 1960 et, à l'époque, suggérait pour la première fois l'existence d'un îlot de stabilité, notion qui a suscité une grande excitation dans la discipline et qui continue à nous motiver.

... DONT LES PROCHAINS SONT MAL CONNUS

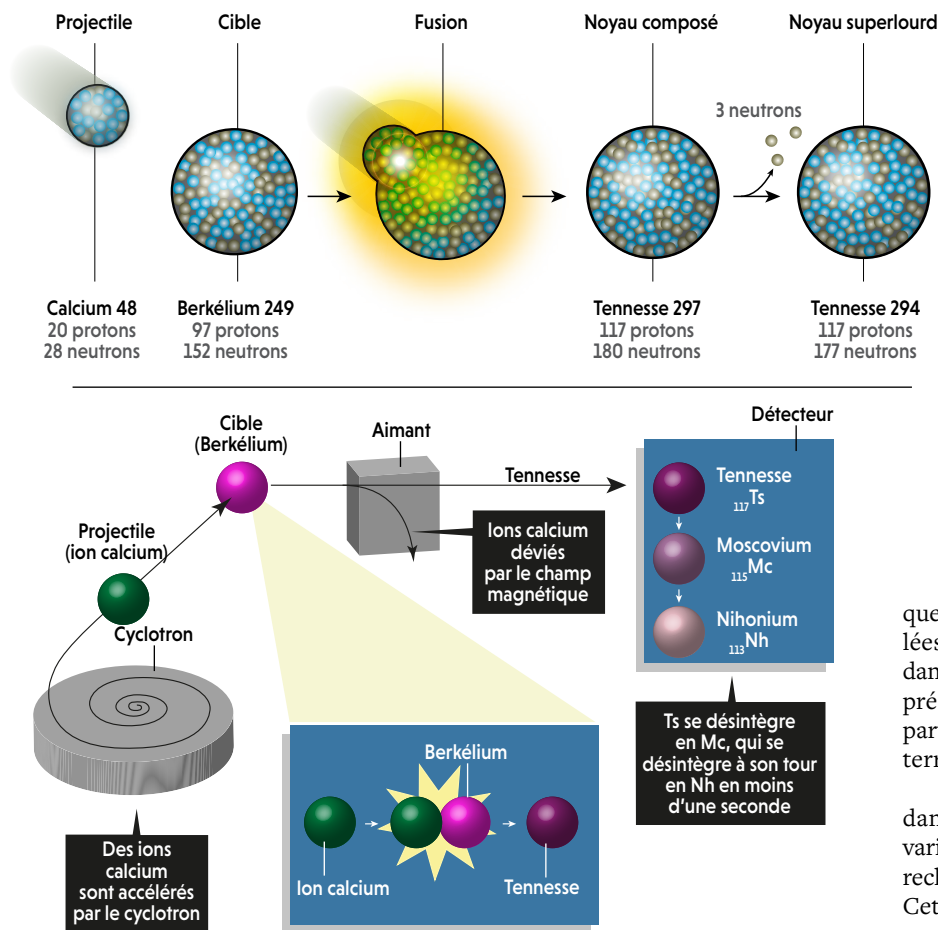
Mais la combinaison 114-184 est-elle vraiment magique ? Nous l'ignorons. D'autres modélisations théoriques du noyau prédisent, par exemple, des configurations associant 120 ou 126 protons et 172 neutrons. Pour certaines des prédictions relatives aux futurs nombres magiques, nous avons une dette envers Albert Einstein. C'est lui qui a expliqué le fait étonnant que la masse d'un atome est inférieure à la somme des masses des protons, neutrons et électrons qui le constituent. Sa célèbre formule $E=mc^2$ indique que le défaut de masse résultant de cette inégalité reflète l'énergie de liaison, l'énergie nécessaire pour assurer la cohésion du noyau. Autrement dit, en pesant des atomes de compositions différentes en neutrons et protons, nous pouvons identifier les configurations qui se traduisent par une cohésion plus forte (c'est-à-dire celles qui correspondent aux nombres magiques) et déterminer dans quelle mesure elles sont plus stables.

Quelle que soit la valeur des prochains nombres magiques, nous pensons que nous



Selon certaines prédictions, le noyau formé de 114 protons et 184 neutrons serait doublement magique





CRÉER DES ÉLÉMENTS SUPERLOURDS

Pour synthétiser un nouvel élément superlourd, les physiciens accélèrent un noyau « projectile » sur un noyau « cible » afin que les deux se combinent. Pour surmonter la répulsion électrique entre les deux noyaux chargés positivement, le projectile doit avoir une vitesse d'environ un dixième de celle de la lumière. Propulsé à une telle vitesse, le projectile vient effleurer le noyau de la cible et la force nucléaire attractive prend alors le dessus. Dans l'exemple présenté ci-contre, les chercheurs ont produit l'élément 117, le tennessee, en fusionnant du calcium et du berkélium. Une fois la fusion effectuée, le « noyau composé » a perdu trois neutrons pour devenir le noyau superlourd de tennessee avec 117 protons et 177 neutrons. Le principe des expériences de l'équipe russo-américaine qui a obtenu pour la première fois un noyau de tennessee, en 2010, est schématisé dans le dessin du bas.

que la collision de deux étoiles denses appelées étoiles à neutrons, avant d'être dispersés dans l'Univers. Dans ce cas, ils pourraient être présents dans les rayons cosmiques qui nous parviennent de l'espace, ou dans des roches terrestres.

De nombreux scientifiques se sont lancés dans l'aventure avec l'aide de techniques variées. Certains sont partis, par exemple, à la recherche de l'élément 110 (le darmstadtium). Cet élément devrait être relativement stable quand il a 184 neutrons (un nombre magique) et présenter des propriétés chimiques similaires à celle du platine, son voisin du dessus dans le tableau périodique. Grâce à des méthodes telles que la spectrométrie de fluorescence des rayons X et la spectrométrie de masse, les scientifiques ont recherché le darmstadtium dans les minerais naturels de platine. Hélas en vain: si ces roches renferment de tels atomes, c'est à un taux inférieur à une partie pour un milliard.

DES ÉLÉMENTS SUPERLOURDS DANS LES ROCHES OU LES RAYONS COSMIQUES?

Les physiciens ont également recherché des traces d'éléments superlourds dans les rayons cosmiques, par exemple au moyen de l'expérience UHCRE (*Ultra-Heavy Cosmic-Ray Experiment* ou Expérience pour les rayons cosmiques ultralourds) embarquée à bord du satellite LDEF (pour *Long Duration Exposure Facility* ou Équipement d'exposition de longue durée) de la Nasa, mais ils n'ont trouvé aucune preuve concluante de leur présence. Les efforts vont sans aucun doute se poursuivre, parce qu'une telle découverte aurait une grande importance sur le plan fondamental. De plus, l'identification de nouveaux éléments pourrait déboucher sur de nouveaux matériaux, dotés chacun de propriétés uniques, ➤

commençons à entrevoir l'îlot de stabilité. Les expériences les plus récentes ont démontré que la demi-vie des éléments superlourds qui sont produits maintenant en laboratoire augmente avec le nombre de neutrons, ce qui suggère que nous approchons du prochain nombre magique de neutrons.

Cette évolution est bien illustrée par le cas de l'élément 112, le copernicium (Cn): alors que la variante de l'élément à 112 protons et 165 neutrons (le ^{277}Cn) ne dure que 0,6 milliseconde environ, la déclinaison plus lourde de 8 neutrons (le ^{285}Cn) a, elle, une longévité environ 50000 fois supérieure! Cette tendance à davantage de stabilité se poursuivra vraisemblablement à mesure que l'on se rapprochera du centre de l'îlot de stabilité, mais jusqu'à quel point? On l'ignore. En particulier, la question se pose de savoir s'il existe des éléments superlourds qui soient complètement stables et donc de durée de vie infinie.

La seule possibilité que de tels éléments existent a poussé certains à les chercher dans la nature. Car le fait que nous n'en ayons pas encore observé ne signifie pas qu'il n'y en ait pas des traces cachées... juste sous notre nez. De tels atomes auraient pu se former avec d'autres éléments plus lourds que le fer lors d'événements astronomiques puissants, tels

> potentiellement intéressantes pour les applications.

Comme nous n'avons pas encore trouvé d'éléments superlourds dans la nature, nous n'avons pas d'autre choix que de les forger en laboratoire. L'opération consiste à partir d'éléments « courants » et à les enrichir en protons. Comment ? En imitant les processus que l'Univers met en œuvre pour former les éléments lourds. Il suffit pour ce faire de bombarder un élément avec des neutrons. Puisque les noyaux contenant trop de neutrons ont tendance à transformer un de leurs neutrons excédentaires en un proton (par un processus de désintégration bêta), la méthode produit *in fine* un élément plus lourd, de numéro atomique supérieur d'une unité. Le problème de cette technique est qu'on ne peut former ainsi que des éléments allant jusqu'au fermium (l'élément 100). Au-delà de ce numéro atomique, le noyau ne subit pas de désintégration bêta et il est impossible d'ajouter des protons.

DES ACCÉLÉRATEURS POUR CRÉER DE NOUVEAUX ÉLÉMENTS

Pour aller plus loin et produire des éléments superlourds tels que l'oganesson, les scientifiques emploient une autre technique : ils amènent deux noyaux si près l'un de l'autre que l'interaction forte entre en jeu. Cette force a une portée extrêmement courte, ce qui signifie que les noyaux doivent pratiquement se toucher pour la ressentir. À une pareille distance, la force de répulsion entre les protons chargés positivement est énorme. C'est pourquoi les physiciens doivent fortement accélérer l'un des noyaux, à une vitesse d'environ 10% de celle de la lumière, et le projeter sur l'autre noyau. Cette vitesse est tout juste suffisante pour surmonter la répulsion due aux protons et permettre aux surfaces des noyaux d'entrer en contact.

Malgré ces conditions, la probabilité pour que les deux noyaux se touchent reste extrêmement faible. En outre, la probabilité de fusion des deux noyaux de départ en un noyau unique décroît à mesure que le nombre de protons du système augmente. Même quand un « noyau composé » unissant les deux noyaux originels se forme, le plus souvent il se scinde presque immédiatement en fragments plus légers. Ces deux tendances (la faible probabilité de formation d'un noyau composé, et la forte chance qu'il se scinde ensuite) jouent contre nous quand nous essayons de synthétiser des éléments superlourds.

En dépit des obstacles, les chercheurs ont enregistré de francs succès grâce à cette approche. Ils ont produit les éléments 113, 115, 117 et 118, dont les découvertes ont été entérinées en 2016 par l'Union internationale de chimie pure et appliquée (l'UICPA a le pouvoir



TUBE D'ACCÉLÉRATEUR

Une vue de l'accélérateur linéaire du GSI, à Darmstadt. Ce dispositif de 120 mètres de long accélère des ions calcium, qui viennent frapper une cible contenant des éléments lourds, afin de produire des noyaux atomiques de nouveaux éléments superlourds.

de reconnaître officiellement et de nommer les nouveaux éléments).

L'élément 113 s'appelle maintenant le nihonium (symbole : Nh), en l'honneur du Japon où ont eu lieu les expériences ayant permis de le synthétiser (*Nihon* est, en japonais, l'un des deux noms du Japon). L'élément 115 est le moscovium (Mc), car c'est dans la région de Moscou, où se trouve l'ITURN, que cet élément a été produit. Et l'élément 117 s'est vu attribuer le nom de tennesse (Ts), d'après l'État du Tennessee, où est implanté le Laboratoire américain d'Oak Ridge qui a fourni les noyaux cibles de berkélium (de numéro atomique 97) nécessaires à la synthèse de l'élément 117. L'oganesson (Og), avec ses 118 protons, ferme le bal des nouveaux intronisés.

EN LIGNE DE MIRE : L'ÉLÉMENT 119

Les projecteurs sont désormais braqués sur l'élément 119, qui ajouterait une nouvelle colonne au tableau périodique. Bien que plusieurs groupes, dont le nôtre, se soient mis en quête de cet atome superlourd, aucun n'a encore décroché la timbale, malgré le recours durant des mois aux accélérateurs les plus puissants au monde. L'un des problèmes rencontrés est que la technique qui fonctionnait bien jusqu'à l'oganesson (qui consistait à fracasser des ions de calcium sur des noyaux plus lourds) échoue au-delà parce que nous ne disposons pas en quantité suffisante de noyaux à plus de



98 protons à utiliser comme cibles. Nous essayons maintenant d'identifier quelles combinaisons d'éléments connus et disponibles offrent les meilleures chances de produire de nouveaux noyaux.

Même si les nouvelles espèces atomiques que nous produisons se désintègrent très vite, des percées notables ont été réalisées récemment dans les capacités d'observation et d'analyse des éléments superlourds. Aussi brève soit-elle, la durée de vie de ces atomes permet d'effectuer des expériences pour tester leurs propriétés physiques et chimiques, afin de savoir par exemple s'ils se comportent plutôt comme des métaux ou comme des gaz à température ambiante.

DES PROPRIÉTÉS DIFFICILES À PRÉVOIR

L'élément le plus lourd dont les propriétés chimiques ont été étudiées est le flérovium (l'élément 114, noté Fl), synthétisé pour la première fois en 1998. Il a d'abord laissé perplexes les physiciens. La place de cet atome dans le tableau périodique, juste au-dessous du plomb, implique qu'il devrait se comporter comme n'importe quel atome de métal lourd. Mais selon des théories remontant à 1975, il pourrait en fait prendre modèle sur les gaz dits rares, ces gaz inertes qui interagissent très peu avec d'autres matériaux. Où se situe la vérité?

Ce comportement étrange calculé du flérovium est la conséquence du nombre de protons que son noyau contient et donc de la valeur de sa charge. En raison de la charge positive très élevée des noyaux d'éléments lourds, leurs électrons (de charge négative) ont des vitesses pouvant atteindre 80% de celle de la lumière, et évoluent par conséquent sur des orbites différentes de celles qui caractérisent les éléments plus légers.

Chez le flérovium, par exemple, cet effet conduit à un grand écart d'énergie entre les deux orbites électroniques les plus externes. Ainsi, pour passer d'une orbite à l'autre, l'électron doit acquérir davantage d'énergie que si l'atome avait un noyau plus petit, tel le plomb situé juste au-dessus dans le tableau périodique. Dans le cas du plomb, la formation d'une liaison chimique fournira plus facilement l'énergie nécessaire aux électrons pour surmonter cet écart. En raison du grand écart entre ses niveaux d'énergie, il se peut que le flérovium ne se prête pas aussi facilement à des réactions chimiques que son homologue plus léger. Il pourrait alors ressembler davantage à des éléments réfractaires aux réactions chimiques (les gaz rares) qu'à des métaux typiques tels que le plomb.

Il est toutefois difficile de prédire comment se comportera exactement le flérovium. Les théories s'accordent généralement sur le fait

qu'il devrait être plus inerte que le plomb, mais il est probablement plus réactif que les véritables gaz rares et pourrait former, par exemple, des liaisons métalliques faibles avec des éléments tels que l'or. Comme personne n'a été en mesure de le produire en quantité, on ignore à quoi ressemblerait un morceau fait de cet élément. Selon certains, il prendrait une apparence blanc argenté ou gris pâle et serait solide à température ambiante.

Les intrigantes propriétés du flérovium ont poussé les physiciens à multiplier les expériences bien que leurs capacités de production se limitent à quelques atomes par jour. Pire, les demi-vies des isotopes les plus stables connus du flérovium ne dépassent pas une à deux secondes. L'un des meilleurs équipements dont dispose la communauté pour produire le flérovium est le *Tasca* (pour *TransActinide Separator and Chemistry Apparatus*), «appareil de tri et de chimie des transactinides», les transactinides désignant tous les éléments de numéro atomique supérieur à 103) situé au centre Helmholtz de recherche sur les ions lourds (GSI), en Allemagne, où nous travaillons tous deux.

PREMIÈRES EXPÉRIENCES DE CHIMIE

L'élément superlourd qu'est le flérovium est obtenu en bombardant du plutonium 244 avec un faisceau de calcium 48. Quand des noyaux de flérovium sont produits, des aimants les dirigent vers deux plaques de 32 centimètres de long se faisant face, couvertes chacune de détecteurs au silicium et espacées d'un demi-millimètre.

Les détecteurs sont recouverts d'une très mince couche d'or, ce qui nous permet d'étudier comment les atomes de flérovium interagissent avec ce métal. La première plaque est maintenue à température ambiante, tandis que la seconde est refroidie grâce à de l'azote liquide jusqu'à -160°C . Pourquoi? Parce que les liaisons faibles (comme celles que les gaz rares établissent avec les matériaux) sont suffisamment fortes pour lier les atomes de flérovium à basse température, mais pas à température ambiante. Par conséquent, si le flérovium se comporte plutôt comme un métal, il ira se coller sur la plaque la plus chaude. En revanche, s'il ressemble plutôt à un gaz rare, il se liera à la surface froide ou ne réagira pas du tout.

Quand notre équipe a utilisé ce dispositif expérimental, nous avons observé deux atomes qui se sont tous deux désintégrés dans les détecteurs à température ambiante. Ce résultat laissait penser que le flérovium se liait plus comme un métal que comme un gaz rare. Mais nous avons été contredits par une autre expérience, menée par une équipe de l'institut Paul Scherrer, en Suisse, et réalisée au Laboratoire ➤

> Flerov des réactions nucléaires, en Russie. Sur les trois atomes que les expérimentateurs ont observés, l'un s'est désintégré sur la zone chaude et deux ont été trouvés dans la zone à basse température (maintenue environ à -90°C). Ils favorisent donc l'option gaz rare. Nous sommes nous-mêmes en train d'analyser de nouvelles données obtenues au GSI et espérons qu'elles clarifieront les propriétés de cet élément fascinant.

DES ÉTUDES DE SPECTROSCOPIE

Récemment, l'un de nous (Michael Block) a effectué avec son équipe les premières expériences de spectroscopie laser sur un élément superlourd, le nobélium (l'élément 102). Les chercheurs sont parvenus à produire des atomes de nobélium au rythme de quelques unités par seconde en bombardant une cible de plomb (82 protons) avec des ions de calcium (20 protons). Les atomes de nobélium étaient ensuite ralentis à l'intérieur d'un gaz d'argon et soumis à des impulsions laser. Pour certaines énergies des photons du laser, un électron de l'atome de nobélium absorbait un photon et s'échappait. En faisant varier la fréquence lumineuse, donc l'énergie des photons laser, Michael Block et ses collègues ont ainsi pu mesurer avec précision l'énergie nécessaire pour arracher un électron à l'atome de nobélium. Or cette «énergie d'ionisation» est l'une des propriétés caractéristiques qui assignent la place d'un élément dans le tableau périodique. Elle détermine la probabilité que l'élément réagisse avec d'autres éléments et forme des liaisons chimiques.

Ces analyses ont d'abord été réalisées sur l'isotope 254 du nobélium (^{254}No , qui a 152 neutrons), puis récemment étendues aux isotopes ^{252}No et ^{253}No afin de savoir comment un déficit en neutrons décale les énergies absorbées par les électrons. Les résultats renseigneront aussi sur la variation de la taille et de la forme des noyaux de ces isotopes, car ces caractéristiques du noyau (de charge positive) ont une influence sur le comportement des électrons (de charge négative).

D'autres chercheurs ont, quant à eux, réussi à créer des liaisons chimiques entre des éléments superlourds et des atomes plus modestes pour étudier comment les espèces exotiques interagissent. Un exemple récent de ce type de recherches est la synthèse de molécules contenant du seaborgium (l'élément 106, de symbole Sg). Dans des expériences réalisées au centre Nishina du Riken, au Japon, une équipe internationale dirigée par le groupe de Christoph Düllmann a produit un isotope de seaborgium dont la demi-vie est d'une dizaine de secondes. Du monoxyde de carbone (CO) a ensuite été ajouté dans l'enceinte contenant le seaborgium et cet élément lourd s'est alors

On est parvenu à créer des liaisons chimiques impliquant des atomes superlourds

transformé en un composé hexacarbonyle $\text{Sg}(\text{CO})_6$ où six molécules de monoxyde de carbone sont liées à l'atome central de seaborgium.

Christoph Düllmann et ses collègues ont montré que dans cette situation, le seaborgium se comporte en fait essentiellement comme ses homologues plus légers et plus courants que sont le tungstène et le molybdène, au même nombre d'électrons de valence.

LE SEABORGIUM, HOMOLOGUE DU MOLYBDÈNE ET DU TUNGSTÈNE

En effet, grâce à une expérience qui s'est déroulée en continu sur une quinzaine de jours, les chercheurs ont observé le seaborgium former le même type de composé avec des molécules de monoxyde de carbone que le molybdène et le tungstène, et au même taux. Les scientifiques vont maintenant tester lequel de ces trois éléments forme les liaisons les plus stables avec le monoxyde de carbone. D'après des calculs effectués à la fin des années 1990, il s'agirait du seaborgium, mais des simulations plus récentes et plus élaborées prévoient que les liaisons entre le monoxyde de carbone et le seaborgium seront plus faibles qu'avec le tungstène.

Ce ne sont là que quelques exemples du type d'expériences fascinantes que les chercheurs réalisent aujourd'hui sur les éléments superlourds, et des nombreuses questions ouvertes auxquelles ils espèrent apporter une réponse. Bien que les nouveaux membres du tableau périodique soient rares et exotiques, les études expérimentales nous apportent des informations directes sur la façon dont ils s'insèrent dans le tableau décrivant les éléments plus classiques, que nous rencontrons dans la vie de tous les jours. Qu'ils soient instables ou d'une grande longévité (et que nous trouvions ou non un jour le cœur de l'îlot de stabilité), les éléments superlourds ont beaucoup à nous apprendre sur les rouages des briques chimiques de la nature. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. Raeder et al., **Probing sizes and shapes of nobelium isotopes by laser spectroscopy**, *Physical Review Letters*, vol. 120, article 232503, 2018.

M. Laatiaoui et al., **Atom-at-a-time laser resonance ionization spectroscopy of nobelium**, *Nature*, vol. 538, pp. 495-498, 2016.

C. E. Düllmann et al., **Special Issue on Superheavy Elements**, *Nuclear Physics A*, vol. 944, pp. 1-690, 2015.

I. Oganessian et al., **À la recherche de l'îlot superlourd**, *Pour la Science*, n° 269, pp. 60-65, mars 2000.

3 FORMULES AU CHOIX



PAG19STD



**OUI, je m'abonne
pour 1 an à** **POUR LA SCIENCE**

FORMULE DÉCOUVERTE
• 12 n° du magazine papier

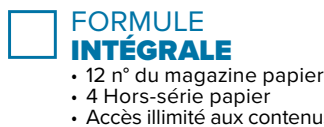
59€
Au lieu de ~~82,80€~~

01A59E



79€
Au lieu de ~~114,40€~~

1A79E



99€
Au lieu de ~~174,40€~~

11A99E

☐ OUI ☐ NON

Groupe Pour la Science - Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris CEDEX 14 - Sarl au capital de 32 000€ - RCS Paris B 311 797 393 - Siret : 311 797 393 000 23 - APE 58.14 Z