

de la lave et des pierres ponce se sont ajoutées aux cendres. Les pluies accompagnant l'éruption ont transformé l'ensemble en un torrent de boue qui s'est solidifié sur 12 à 25 mètres de hauteur, de sorte que la couche de cendre initiale et son contenu sont restés intacts.

Pliny le jeune raconte en détail la chronologie des événements. Les habitants avaient eu le temps de fuir ou de se mettre à l'abri, quand, 12 heures après le début de l'éruption, une première vague de cendres volcaniques et de gaz brûlants a traversé la ville, sans laisser de dépôt et sans faire de dégâts sur les objets résistants à la chaleur. Puis, quand cette vague de cendres a atteint la falaise, les éléments les plus denses ont pénétré en trombe à l'intérieur des hangars où une partie de la population s'était réfugiée.

La plupart des victimes étaient assises ou couchées sur le sol (renversées par la vague de cendres). Les crânes et les os présentent des fractures noircies par la chaleur et l'émail des dents était fissuré, comme après une incinération. D'après ces indices, associés à l'analyse des tuiles retrouvées sur place, les archéologues ont estimé que la température qui régnait au moment de l'impact de la vague de poussières et de chaleur sur les hangars avait atteint 500 °C.

La vitesse de déplacement des cendres brûlantes et leur volume n'ont pas laissé aux occupants le temps de fuir. On a calculé que dans un des hangars où 30 personnes ont été ensevelies, huit mètres cubes de matière en fusion ont instantanément vaporisé l'eau contenue dans les cellules des tissus. La cendre s'est déposée sur les articulations des os et sur les résidus de tissus organiques, formant une enveloppe rigide qui a figé la position des victimes. La position des membres a révélé l'absence de gestes de protection ou de signes d'agonie.

Les légères flexions des pieds et des mains que l'on observe sur les squelettes sont dues à des contractions qui se sont produites en une seconde au contact de la chaleur, avant que la cendre ne devienne trop compacte. L'attitude pugilistique caractéristique des victimes de feux, qui résulte du raccourcissement des tendons et des muscles après la mort, n'est apparente que sur quelques squelettes, ce qui prouve qu'ils ont été immobilisés en quelques secondes. Ainsi, les victimes sont mortes sous l'effet du choc thermique et non d'asphyxie, comme on le supposait jusqu'à présent.

Atomes exotiques

Des effets quantiques autorisent certains atomes à réagir à des températures très basses, alors que les lois de la chimie devraient le leur interdire.

Depuis les années 1930, on sait qu'il existe dans l'Univers de très faibles quantités d'antimatière, constituée de particules semblables aux particules ordinaires, mais dont les propriétés sont inversées. Au proton (unique constituant du noyau de l'atome d'hydrogène) de charge électrique positive, correspond l'antiproton de même masse, mais de charge électrique négative. La rencontre d'une particule et de son antiparticule provoque leur annihilation mutuelle et la libération d'un rayonnement. Ainsi, une antiparticule pénétrant dans un matériau ordinaire n'y survit, au mieux, que quelques millièmes de milliardièmes de seconde. Pourtant, environ trois pour cent des antiprotons arrêtés par une cible d'hélium pur survivent plusieurs microsecondes. Cette stabilité inhabituelle a été mise en évidence au CERN, en 1993, par l'équipe de Toshimitsu Yamazaki : elle est due à la participation de l'antiproton à la constitution d'un objet exotique, nommé atomcule. Les réactions chimiques des atomcules relèvent d'effets quantiques et pourraient ressembler à celles des gaz froids des milieux interstellaires.

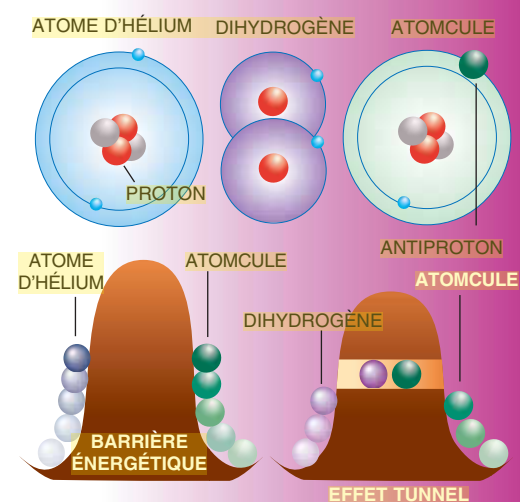
Un atomcule est constitué d'un atome d'hélium qui a perdu un électron par ionisation et d'un antiproton. Il s'apparente à un atome exotique, où l'antiproton jouerait le rôle d'une sorte d'«électron lourd». Toutefois, l'antiproton étant environ 2 000 fois plus massif qu'un électron, cet assemblage s'apparente aussi à une molécule diatomique inhabituelle : l'un des noyaux est chargé positivement, mais l'autre négativement!

Ces atomcules ont un comportement chimique étonnant. Dans l'hélium pur, ils résistent à des millions de collisions. Cependant, un contaminant moléculaire comme le dihydrogène, H₂, détruit l'atomcule dès la première collision, même à très basse température. Récemment, on a étudié de façon détaillée cette réaction de destruction à des températures de 30 kelvins.

Pour comprendre les différents comportements des atomcules vis-à-vis des atomes d'hélium ou des molécules de dihydrogène, nous avons appliqué les méthodes de chimie phy-

sique à l'étude de ces mécanismes exotiques. Nous avons essayé d'établir le chemin réactionnel, c'est-à-dire les étapes par lesquelles passent les deux espèces chimiques – l'atomcule et l'atome d'hélium dans un cas, l'atomcule et la molécule de dihydrogène dans l'autre – au cours de leur rapprochement et de leur réaction.

Pour cela, nous avons évalué les interactions du nuage électronique entourant le noyau d'hélium, d'un proton et d'un antiproton – et ceci pour des milliers de configurations possibles de ces nuages. Lorsque les deux espèces chimiques se rapprochent, leurs nuages électroniques se repoussent et constituent une barrière d'énergie plus ou moins facile à franchir. Le chemin réactionnel est alors décrit par l'évolution de l'énergie en fonction de la distance qui sépare les deux espèces. La courbe qui décrit cette évolution présente une bosse que les deux espèces doivent franchir pour se rejoindre. Si leurs vitesses d'agitation sont suffisantes, elles escaladent la pente, se rejoignent et réagissent ; sinon, elles s'arrêtent à mi-pente, puis retombent dans leur «vallée», sans se rencontrer.



Le noyau d'un atome d'hélium est constitué de deux protons (en rouge) et de deux neutrons (en gris). Deux électrons (en bleu) assurent l'équilibre électrique. Quand un antiproton, l'antiparticule d'un proton, c'est-à-dire une particule de même masse que le proton, mais de charge opposée, se combine à un atome d'hélium qui a perdu un électron, naît un atomcule, une particule exotique dont l'une des particules négatives en orbite est presque aussi massive que le noyau. Un tel atomcule est relativement stable en présence d'hélium, car la barrière énergétique est trop élevée et interdit la réaction des deux entités chimiques. En revanche, l'atomcule n'est pas stable en présence d'hydrogène : non seulement la barrière à franchir est moins élevée, mais la réaction se fait aussi par effet tunnel : les entités traversent la barrière et réagissent.

Lors de la rencontre d'un atomcule et d'un atome d'hélium, la barrière d'énergie à franchir est très élevée : le plus souvent, les deux espèces se repoussent et l'atomcule survit relativement longtemps dans l'hélium pur. Au contraire, dans le cas de la rencontre d'un atomcule et d'une molécule de dihydrogène, la barrière d'énergie est environ 150 fois plus faible. Ceci, pourtant, n'explique qu'en partie la facilité avec laquelle le dihydrogène réagit avec les atomcules. En effet, la réaction ne devrait pas se produire aux très basses températures, quand l'énergie d'agitation des atomes et des molé-

cules est inférieure à l'énergie qu'il leur faudrait pour franchir la barrière. C'est compter sans la nature quantique du mouvement des noyaux légers (protons et antiprotons) qui leur permet de franchir l'obstacle par effet tunnel : au lieu d'escalader la barrière d'énergie, ces espèces chimiques la traversent. Par ce mécanisme, les deux noyaux se rencontrent et s'annihilent, sans passer par les étapes intermédiaires de haute énergie.

Ces étranges franchissements quantiques entrent en jeu dans la chimie des gaz froids interstellaires, notamment lors des collisions à basse tempé-

rature mettant en jeu des molécules (l'ammoniac NH_3 , par exemple) ou des radicaux (OH^*). Aujourd'hui, les probabilités de réaction d'un atomcule sont connues pour chacun de ses états quantiques. Les réactions de l'atomcule pourraient servir de système de référence pour l'étude des réactions chimiques qui se produisent dans les gaz interstellaires. Si nous apprenons à utiliser les atomcules pour explorer ces phénomènes, ils sortiront de leur statut de curiosité pour devenir un outil pour les chimistes et pour les astrophysiciens.

Sébastien SAUGE et Pierre VALIRON
Observatoire de Grenoble

Un dinosaure géant

L'herbivore découvert en Égypte était plus gros que Diplodocus

Les restes d'un sauropode géant, viennent d'être découverts près de l'oasis de Bahariya, dans le désert égyptien. Déjà fouillé avant la Première Guerre mondiale par le paléontologue allemand Ernst Stromer von Reichenbach (1871-1952), ce site avait livré un grand nombre d'ossements fossiles, qui furent détruits lors d'un bombardement allié à Munich, en 1944. Toutefois, les restes avaient été décrits en détail dans une série de monographies publiées entre les deux guerres sous le titre de *Résultats des voyages d'étude du Professeur E. Stromer dans les déserts d'Égypte*. Stromer avait découvert les restes de nombreux vertébrés, notamment des dipneustes (des «poissons à poumons»), des crocodiles et des serpents primitifs. Parmi les dinosaures figuraient trois très grands carnivores qui dépassaient une douzaine de mètres de hauteur, ainsi que l'herbivore *Aegyptosaurus*, de la famille des titanosauridés (de grands dinosaures herbivores du groupe des sauropodes, dont le corps était généralement recouvert de grosses plaques osseuses).

De quand dataient ces fossiles ? Les sites égyptiens constituent la terminaison orientale d'une vaste bande de terres du Crétacé supérieur (plus précisément du Cénomanién, entre -99 et -93 millions d'années) qui affleure dans tout le Maghreb, depuis le Sud marocain jusqu'à l'Ouest, en passant par l'Algérie, le Sud tunisien et la Libye. De nombreux restes de vertébrés continentaux y ont été découverts.

À Bahariya, les paléontologues ont récemment découvert plusieurs osse-

ments d'un titanosauridé, qui serait une forme différente d'*Aegyptosaurus*. Ils l'ont baptisé *Paralititan strombe* : le nom de genre évoque le fait que ce géant a été découvert dans des dépôts géologiques qui se sont formés en milieu paralaque, c'est-à-dire non loin de la mer ; celui de l'espèce fait référence à Ernst Stromer. Les paléontologues ont exhumé quelques très grosses vertèbres caudales, quelques côtes et des os de pattes antérieures, dont un humérus de 1,69 mètre de longueur. On en déduit que *Paralititan* mesurait près de 30 mètres de longueur et pesait entre 60 et 80 tonnes. Ces mensurations le placent dans la catégorie des très gros dinosaures, peu après *Argentinosaurus*, considéré aujourd'hui comme le plus gros dinosaure connu (découvert en Argentine en 1990, il mesurait plus de 30 mètres de longueur, huit mètres de hauteur et pesait 90 tonnes, soit l'équivalent d'une quinzaine d'éléphants). *Paralititan* était le contemporain d'un autre sauropode énorme découvert dans le Sud marocain en 1954. Certaines de ses vertèbres mesurent 1,50 mètre de hauteur, et l'animal atteignait probablement 35 à 40 mètres de longueur.

Avec la découverte du nouvel animal fossile égyptien, les dinosaures herbivores géants du Crétacé supérieur (de -99 à -65 millions d'années environ) détrônent définitivement les géants plus «classiques» de la fin du Jurassique (de -154 à -135 millions d'années environ), tels *Brachiosaurus* et *Diplodocus* ; seul *Seismosaurus*, découvert plus récemment, atteignait probablement 30 mètres de longueur. Pourtant, il n'y a pas si longtemps, certains paléontologues pensaient que les très gros dinosaures avaient décliné, puis disparu à la fin du Jurassique. L'intensification des recherches sur les écosystèmes continentaux de l'ère

secondaire (de -250 à -65 millions d'années) entraîne depuis une vingtaine d'années un flot ininterrompu de découvertes dans le monde entier, qui ont infirmé cette hypothèse, uniquement fondée sur l'absence de fossiles de dinosaures géants postérieurs au Jurassique.

Aujourd'hui, on sait que ces énormes herbivores de plus de 40 tonnes étaient courants non seulement au Jurassique supérieur, mais également plus tard, pendant tout le Crétacé. En revanche, ils ont disparu il y a 65 millions d'années, en même temps que les autres dinosaures. Le plus gros mammifère connu après cette époque ne pesait que 15 tonnes.

Jean LE Lœuff, Musée d'Espéraza



Près de l'Oasis de Bahariya, les paléontologues ont découvert un humérus de 1,69 mètre : le dinosaure entier devait mesurer 30 mètres de longueur et peser 70 tonnes environ (on a représenté un éléphant à la même échelle).