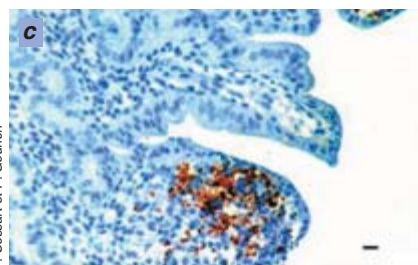
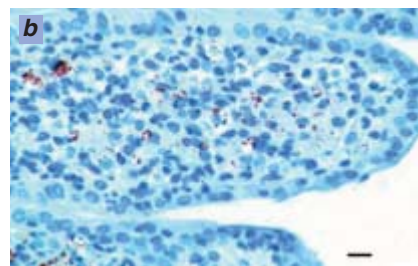
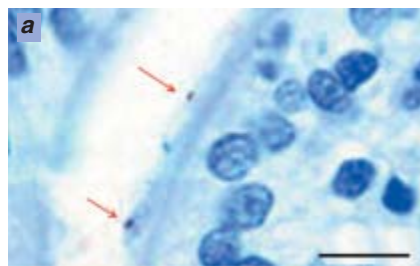


pour l'interaction avec l'internaline. Ainsi, l'interaction a lieu quand le seizième acide aminé est une proline, comme chez l'être humain, mais elle n'a pas lieu quand cet acide aminé est un acide glutamique (c'est le cas chez le rat ou chez la souris). Pour leur étude, les biologistes de l'Institut Pasteur ont utilisé, d'une part, des cobayes dont la E-cadhérine a aussi une proline en position 16, et, d'autre part, des souris qu'ils ont mises au point par transgénèse afin que leurs cellules intestinales produisent de la E-cadhérine humaine.

Ils ont ainsi montré que *Listeria monocytogenes*, ingérée oralement, franchit la barrière intestinale seulement chez les animaux dont la E-cadhérine a une proline en position 16. Toutefois, la E-cadhérine est enfouie entre les cellules intestinales. Comment la bactérie *Listeria monocytogenes* l'atteint-elle? Les cellules intestinales ont une durée de vie de trois jours, puis sont remplacées par de nouvelles cellules. Les bactéries profi-



P. Cossart et P. Gounon

tent peut-être du constant renouvellement de ces cellules pour se glisser entre elles au moment où l'une d'elles se détache. Ou bien utilisent-elles un autre facteur d'invasion, la protéine InlB, dont on a montré, sur des cellules en culture, qu'elles déstabilisent les jonctions intercellulaires et rendent ainsi les E-cadhérines accessibles à la bactérie *Listeria monocytogenes*.

Quand on aura totalement élucidé les mécanismes d'entrée de la bactérie dans l'organisme, on pourra peut-être les utiliser pour introduire, dans les cellules intestinales ou dans des cellules plus profondes, des médicaments, voire même des gènes thérapeutiques.

La bactérie *Listeria monocytogenes* (les flèches) franchit la barrière intestinale, ici d'un cobaye, grâce à une molécule qui se lie à une protéine de la membrane des cellules intestinales. Après 72 heures (b), les bactéries infectent les villosités de l'intestin, et, trois jours plus tard (c), y forment des foyers infectieux. Chaque trait noir représente 10 micromètres.

Mort subite

Il y a plus de 2 000 ans, à Pompéi, les cendres brûlantes du Vésuve ont figé les organes des victimes de l'éruption, en vaporisant instantanément l'eau qu'ils contenaient.

Le 24 août 79, le Vésuve est entré en éruption, ravageant Pompéi et Herculaneum. Quelque 300 habitants d'Herculaneum se sont réfugiés sur la plage et dans les 12 hangars à bateaux qui s'y trouvaient. Les fouilles des années 1980 et 1990 avaient mis au jour la plage et six de ces hangars. Les archéologues avaient enlevé les squelettes, bijoux et autres objets, mais n'avaient pas étudié *in situ* l'effet produit par les matières volcaniques sur les corps. Depuis 1997, dans deux des six hangars, Pier Paolo Petrone, Giuseppe Mastrorrenzo et leurs collègues de l'Université Frédéric II de Naples ont découvert 80 squelettes enterrés sous les cendres volcaniques. Pour la première fois, on a étudié la biologie de ces vestiges : ils indiquent que les victimes n'ont pas été asphyxiées, mais tuées instantanément par la chaleur, lorsqu'une vague de poussières et de gaz brûlants s'est abattue sur eux.

Moins connue que Pompéi, la ville d'Herculaneum a subi la même catastrophe. Dans l'Antiquité, elle se trouvait sur la route littorale qui rejoint Naples et Pompéi, à une dizaine de kilomètres de Naples. Accrochée aux dernières pentes du Vésuve, elle était installée sur une falaise d'environ 20 mètres de hauteur surplombant la mer. Les fouilles y ont été plus difficiles qu'à Pompéi, où les cendres, transportées par le vent, ont formé des couches peu épaisses (cinq à six mètres), sans consistance et perméables à l'eau. À Herculaneum, des débris volcaniques,



Pier Paolo Petrone

Les squelettes mis au jour dans les hangars à bateaux d'Herculaneum ont été figés dans la position des victimes au moment de la mort, par une sorte de sarcophage de cendres. L'étude bioarchéologique *in situ* n'a révélé aucun geste d'agonie, confirmant que la mort a été instantanée.

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.

Plinie 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.

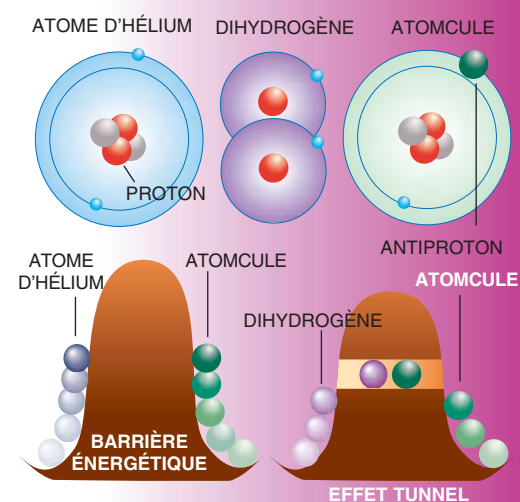
Un atomcule est constitué d'un atome d'hélium qui a perdu un électron par ionisation et d'un antiproton. Il s'apparente à un atome exotique, où l'antiproton jouerait le rôle d'une sorte d'«électron lourd». Toutefois, l'antiproton étant environ 2 000 fois plus massif qu'un électron, cet assemblage s'apparente 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.