

L'azote lunaire

Au cours des âges, le Soleil, les météorites et les comètes ont apporté leur azote sur la Lune et à la Terre.

Le sol lunaire est une accumulation de débris provenant de météorites et probablement de comètes, tombés sur notre satellite depuis sa création voici 4,4 milliards d'années. À cela s'ajoutent les poussières fines et les gaz venus de l'espace interstellaire et surtout, du vent solaire. Tous ces fragments sont d'âges et de compositions différentes, selon leur provenance. La Lune a donc enregistré les apports de matière cosmique depuis sa création. En revanche, sur Terre, l'atmosphère empêche, depuis qu'elle existe, cet enregistrement dans le sol. Les apports de matière extraterrestre inscrits dans le sol terrestre avant la formation de l'atmosphère ont, quant à eux, été détruits par l'érosion et la tectonique des plaques. Parmi les éléments d'origine cosmique, l'azote est l'un des plus importants pour la vie, car il entre dans la composition de nombreuses molécules organiques. Le diazote représente en outre quelque 80 pour cent de notre atmosphère ! En étudiant des grains de sol lunaire, nous venons de prouver que l'azote terrestre, qui a la même origine que l'azote lunaire, a deux provenances majeures : le Soleil et les météorites.

Les 17 missions Apollo ont récupéré un échantillonnage représentatif du sol lunaire qui fut exposé au bombardement cosmique à différentes époques géologiques. Au cours des trois dernières décennies, les cosmochimistes ont analysé la composition de ces échantillons et tenté d'en comprendre la provenance. Ils ont découvert que les gaz rares contenus dans les sols lunaires y sont implantés par le vent solaire. Leur composition chimique et isotopique est constante et similaire à celle que l'on mesure lors d'expériences d'irradiation par le rayonnement solaire. Si les gaz rares du sol lunaire proviennent du vent solaire,

est-ce le cas de l'azote ? Les chercheurs ont constaté que la composition isotopique de l'azote du sol lunaire variait beaucoup. D'une mesure à l'autre, le rapport de la concentration d'azote 14 sur celle d'azote 15 pouvait changer de 30 pour cent.

La première hypothèse lancée pour expliquer cette variabilité fut que la composition isotopique du Soleil avait varié au cours du temps, modifiant celle du rayonnement solaire. Si c'est le cas, les concentrations en isotopes de gaz rares auraient dû changer elles aussi, puisque ces éléments sont présents dans le Soleil. Les astrophysiciens ne connaissaient en outre aucun mécanisme physique susceptible d'engendrer des variations isotopiques aussi grandes. L'idée que ces écarts dans la composition en azote du sol lunaire résultent des contributions successives de plusieurs sources cosmiques s'est alors imposée. Il restait à en apporter une preuve expérimentale.

C'est ce que nous avons fait grâce à la sonde ionique du Centre de recherche en pétrochimie et géochimie de Nancy. Dans cette installation, des ions sont projetés sur une zone précise de l'échantillon, et en arrachent les atomes. Les « ions secondaires » ainsi produits sont analysés à l'aide d'un champ magnétique qui les dévie différemment selon leur nature, ce qui permet de les séparer. Cette technique livre les concentrations et les compositions isotopiques de tous les éléments présents dans la zone analysée, dont la position est connue à 10 nano-

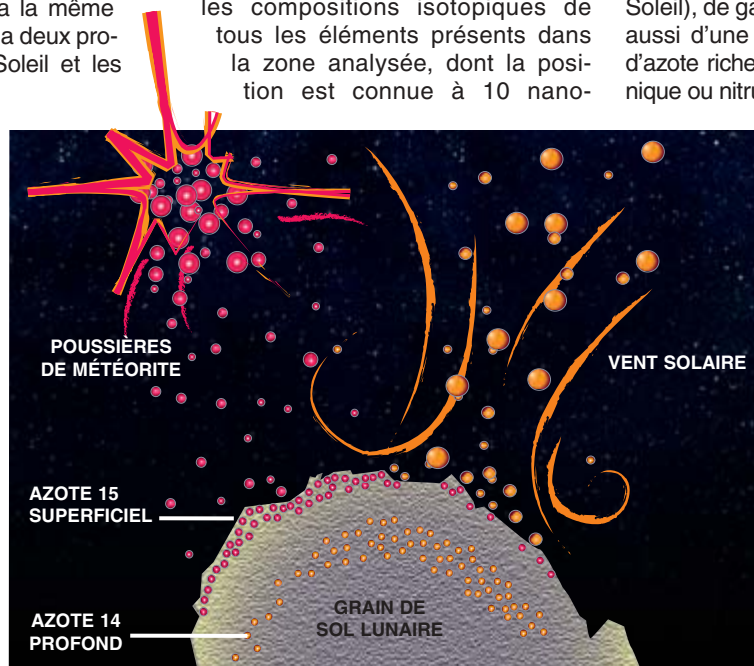
mètres près. Grâce à cette résolution spatiale, nous avons mesuré de quelle façon les concentrations d'azote 14, d'azote 15 et d'autres isotopes varient à partir de la surface du grain de sol lunaire étudié.

Qu'avons-nous constaté ? Nous savions que l'énergie cinétique des ions apportés par le vent solaire les fait pénétrer jusqu'à quelque 50 nanomètres à l'intérieur des grains. Or l'azote trouvé à cette profondeur est pauvre en azote 15, mais riche en azote 14. Comme il n'est pas associé à du deutérium (un atome d'hydrogène alourdi par un neutron qui est décomposé par le Soleil), on en déduit que cet « azote profond » est d'origine solaire.

En revanche, l'azote trouvé dans les premiers nanomètres contient 24 pour cent de plus d'azote 15 et est associé à des atomes de deutérium : il provient de météorites ou de comètes, qui contiennent du deutérium. L'impact sur le sol lunaire vaporise certains éléments, tel l'azote, qui, ensuite, se déposent en surface.

Ainsi, nous avons mis en évidence la grande hétérogénéité des isotopes de l'azote dans le Système solaire. La majorité de cet élément contenu dans le Soleil est pauvre en azote 15. En revanche, l'azote contenu dans les planètes et les météorites est enrichi en azote 15. Cette dichotomie ne peut s'expliquer que par la présence, dans la nébuleuse protosolaire (qui a formé le Soleil), de gaz pauvre en azote 15, mais aussi d'une forme probablement solide d'azote riche en azote 15 (matière organique ou nitrures, par exemple). Il y aurait eu un transport de matière à l'échelle du Système solaire : les matières organiques azotées présentes dans les régions externes seraient parvenues dans la région centrale, où s'est formée la Terre. Nous espérons pouvoir appliquer bientôt notre méthode à tous les échantillons de sol lunaire du programme Apollo. Grâce à ces témoins du bombardement cosmique à plusieurs époques, nous pourrions quantifier le flux de matière reçu par la Lune au cours du temps, c'est-à-dire aussi celui qu'a reçu la Terre.

Bernard MARTY
et Marc CHAUSSIDON,
Centre de recherches
pétrographiques et
géochimiques, Nancy



Les constituants du vent solaire (les sphères jaunes) contiennent surtout de l'azote 14. Les particules pénètrent dans les grains de sol lunaire à environ 50 nanomètres de profondeur. Au contraire, en surface des grains, la proportion d'azote 15 (les sphères rouges) est supérieure : cet azote provient des retombées météoritiques. Ces compositions isotopiques renseignent les astronomes sur les flux de matière reçus par la Lune au cours du temps.

Des billes, modèles de cohabitation

Pour prévoir les interactions entre objets microscopiques, on étudie le comportement de billes macroscopiques chargées.

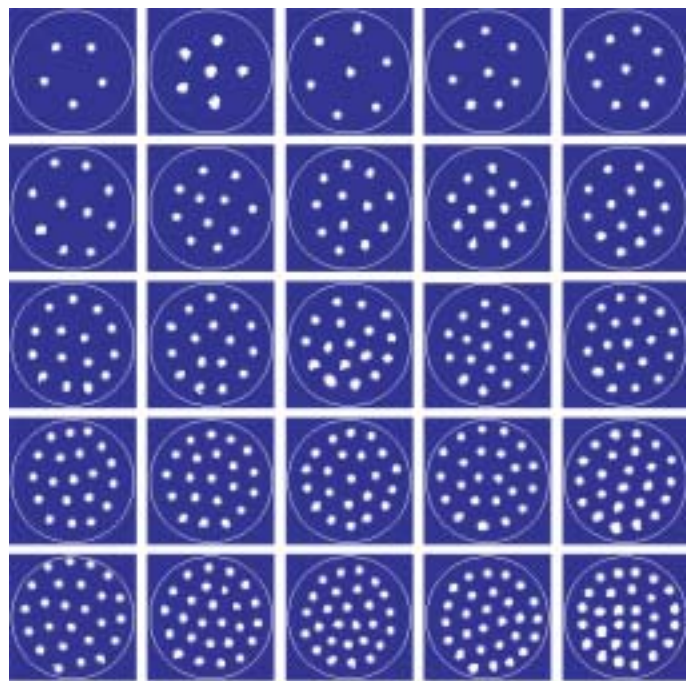
Comment s'organisent des êtres qui se détestent, mais qui sont condamnés à vivre sous le même toit? Loin des tribunaux, cette question se pose dans les systèmes physiques chaque fois que des objets qui se repoussent sont confinés à l'intérieur d'un espace clos. Michel Saint Jean, Catherine Even et Claudine Guthmann, du Groupe de physique des solides des Universités Paris VI et VII, ont réalisé un dispositif à l'échelle macroscopique qui permet d'observer pour la première fois les arrangements possibles de tels objets.

M. Saint Jean et ses collègues placent des billes d'acier de quelques millimètres de diamètre au centre d'un anneau métallique pris en sandwich entre deux plaques horizontales, l'une en métal et l'autre en verre, dont la surface a été rendue conductrice. Un potentiel électrique positif est appliqué sur la surface du verre, ce qui attire les électrons de la plaque inférieure vers les billes. L'espace qui sépare les billes de l'électrode supérieure interdit la circulation du courant et les charges restent piégées dans les billes : elles se chargent négativement et se repoussent. L'anneau, isolé des deux plaques

conductrices et soumis à un potentiel négatif, crée un champ électrique qui confine les billes à l'intérieur de l'anneau et les repousse vers son centre.

On ajoute des billes progressivement à l'intérieur de l'anneau et l'on observe les structures qu'elles forment. On observe que la première bille se place au centre ; avec une seconde, elles forment une paire centrée ; avec une troisième, un triangle isocèle ; avec une quatrième, un carré. Quand le nombre de billes atteint cinq, il existe deux motifs possibles : un pentagone ou un carré avec une bille au centre. Avec six billes, le nombre de motifs possibles passe à trois. L'un est un pentagone avec une bille au centre, un autre est un hexagone, et le dernier est une situation intermédiaire entre les deux, où la bille qui se trouvait au centre du pentagone se décale légèrement en direction de la position qu'elle prend au sein de l'hexagone. Le nombre d'organisations possibles augmente à chaque fois que l'on ajoute de nouvelles billes.

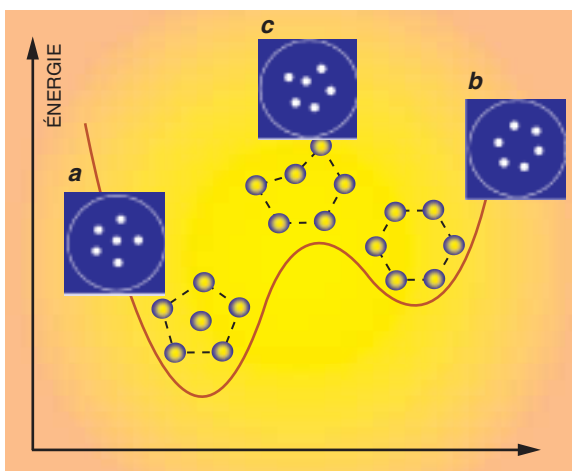
Pour un même nombre de billes, quelle est la configuration la plus stable parmi toutes celles observées? Pour le savoir, un système mécanique fait vibrer les plaques. L'agitation ne doit pas être trop intense, sinon le «cristal de billes» fond, c'est-à-dire que toute organisation macroscopique disparaît : les billes quittent leur position définie et retrouvent leur liberté comme dans un liquide ou dans un gaz. Plus la configuration résiste à l'agitation, plus elle est stable. Pour six billes, le résultat est par ordre décroissant de stabilité : le pentagone centré, l'hexagone, puis l'arrangement intermédiaire, le pentagone décentré. Pour qu'une structure existe, c'est-à-dire qu'elle persiste dans le temps, il faut qu'elle résiste à de petites variations de la position des billes. Autrement dit, les structures stables sont situées dans «les vallées de stabilité», où l'énergie est minimale. Le pentago-



Des billes métalliques chargées qui se repoussent et qui sont confinées à l'intérieur d'un anneau par un champ électrique radial adoptent diverses configurations. On fait varier ici le nombre de billes de 5 à 29. L'anneau est figuré par le cercle blanc. Pour un même nombre de billes, plusieurs organisations sont observées, mais seule la plus stable a été représentée.

ne centré, l'état le plus stable des trois configurations observées, correspond au minimum global de l'énergie. L'hexagone est également dans une vallée de stabilité, dont «l'altitude» est supérieure à la vallée du pentagone : c'est un état métastable. Sur la courbe d'énergie, le pentagone centré et l'hexagone se situent dans deux vallées mitoyennes, l'une étant plus basse que l'autre. Pour passer d'une vallée à l'autre, on doit franchir le col qui les sépare. Ce col correspond au troisième état observable : le pentagone décentré.

Peut-on prévoir les différentes organisations adoptées par les billes? Les billes sont partagées entre deux tendances : celle de s'arranger en réseau le plus régulier possible en se plaçant aux sommets de triangles équilatéraux, et celle de respecter la symétrie axiale du champ de confinement. Les états les plus stables seront ceux qui satisfont au mieux ces deux tendances simultanément. Pour six billes, le pentagone centré et l'hexagone respectent tous les deux la symétrie du confinement, mais le pentagone centré est plus proche du réseau triangulaire que l'hexagone, ce qui lui confère une plus grande stabilité. Pour un grand nombre de billes, on découvre progressivement tous les arrangements autorisés.



Pour un nombre de billes égal à six, il existe trois structures stables. La première (a), le pentagone, correspond à un minimum de l'énergie du système ; la deuxième, l'hexagone (b), également, mais sa «vallée de stabilité» est plus élevée que la première. La troisième configuration (c), instable, est un état intermédiaire dont l'énergie correspond au col qui sépare les vallées des deux autres états.

Anxiété et équilibre

Chez la souris, quand on soulage l'anxiété, on améliore l'équilibre. C'est le premier modèle animal pour l'étude des liens entre anxiété et troubles de l'équilibre chez l'homme.

Certaines personnes qui souffrent de crises d'angoisse ou de panique, ont des perturbations de l'équilibre. Inversement, des personnes souffrant de troubles de l'équilibre présentent souvent des épisodes d'anxiété. Elles ont des sensations de vertige, d'instabilité, ont l'impression qu'elles vont s'évanouir. Toutefois, le lien entre un dysfonctionnement du système qui assure l'équilibre et un trouble anxieux n'était pas encore établi, chez l'animal. Avec nos collègues, nous avons mis au point un modèle animal qui confirme ce lien.

Un contrôle efficace de la locomotion dépend de l'interaction de trois systèmes, le système visuel, le système vestibulaire et le système du toucher. Le système vestibulaire, localisé dans l'oreille interne, assure le contrôle de l'équilibre, l'orientation spatiale et le maintien de la posture. Quand l'un de ces systèmes est déficient, les autres systèmes compensent parfois le déficit. Par ailleurs, on dispose aujourd'hui de divers modèles animaux d'anxiété. Différents tests permettent de décrire précisément les composantes de

l'anxiété chez l'animal. On a ainsi détecté des lignées de souris «anxieuses». Pour ce faire, on utilise des tests de comportement : par exemple, les souris anxieuses se réfugient dans des boîtes noires et évitent de séjourner dans les espaces ouverts. De plus, on vérifie que ces comportements disparaissent quand on leur administre des anxiolytiques.

Dans notre étude, nous avons cherché à évaluer les relations entre anxiété et contrôle de l'équilibre. L'étude a été conduite avec une souche de souris anxieuses et avec une souche de souris témoins (non anxieuse).

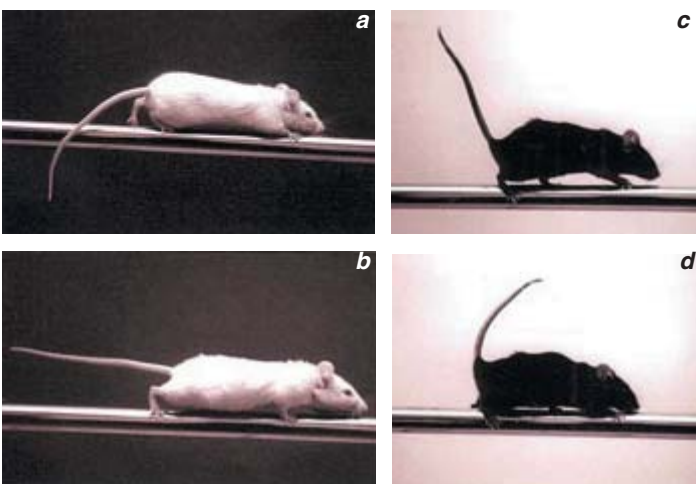
Les souris ont été soumises au test de la barre tournante : elles doivent se déplacer sur une barre en rotation. On constate que les souris anxieuses adoptent une position qui n'est pas adaptée : elles ont le tronc proche de la barre et la queue en position basse. Elles perdent souvent l'équilibre et tombent de la barre. Au contraire, les souris non anxieuses ont le tronc arqué au-dessus de la barre et la queue bien dressée. Elles ne tombent quasiment pas de la barre.

Quand on administre aux souris anxieuses un traitement qui soulage leur anxiété (un anxiolytique, tel le diazépam), on constate que leur équilibre s'améliore. Elles se déplacent mieux sur la barre et leur posture révèle un meilleur positionnement de la queue et du tronc. Au contraire, les souris normales à qui l'on administre une substance anxiogène ont un équilibre perturbé : elles s'affaissent sur la barre et tombent souvent.

Ainsi, nous avons mis en évidence un

lien entre anxiété et troubles de l'équilibre chez la souris, lien modulable par les substances pharmacologiques. Notre modèle sera utile pour l'étude des mécanismes et des neuromédiateurs qui participent au contrôle de l'équilibre et de la posture dans des conditions anxiogènes. Nous espérons comprendre comment la perception de l'environnement, l'action et l'anxiété sont liées dans les situations normales et dans les situations pathologiques, les crises de panique, par exemple.

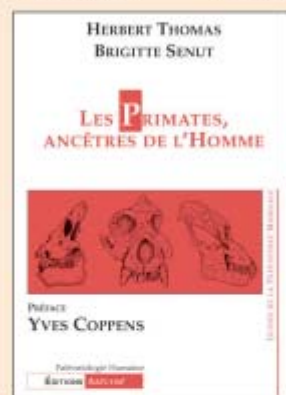
Ève LEPICARD et
Georges CHAPOUTHIER
Unité CNRS UMR 7593



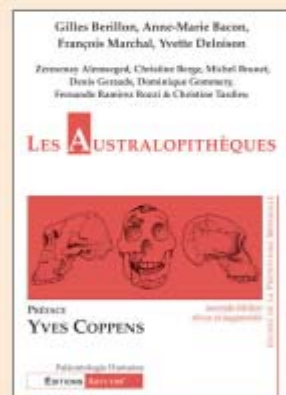
Sur une barre en rotation, les souris anxieuses s'agrippent à la barre (a), ont le tronc proche de la barre, la queue baissée et tombent souvent. Quand on leur administre un anxiolytique, elles retrouvent leur équilibre (b). Elles ont alors quasiment la position des souris non anxieuses (c). En revanche, quand on administre aux souris non anxieuses une substance anxiogène, elles s'affaissent sur la barre comme des souris anxieuses (d).



ISBN 912741-04-1 128 p., 90 F



ISBN 912741-22-X 184 p., 90 F



ISBN 912741-21-1 256 p., 90 F



ISBN 912741-07-6 344 p., 230 F

ÉDITIONS ARTCOM
53, rue Boissière 75116 - Paris