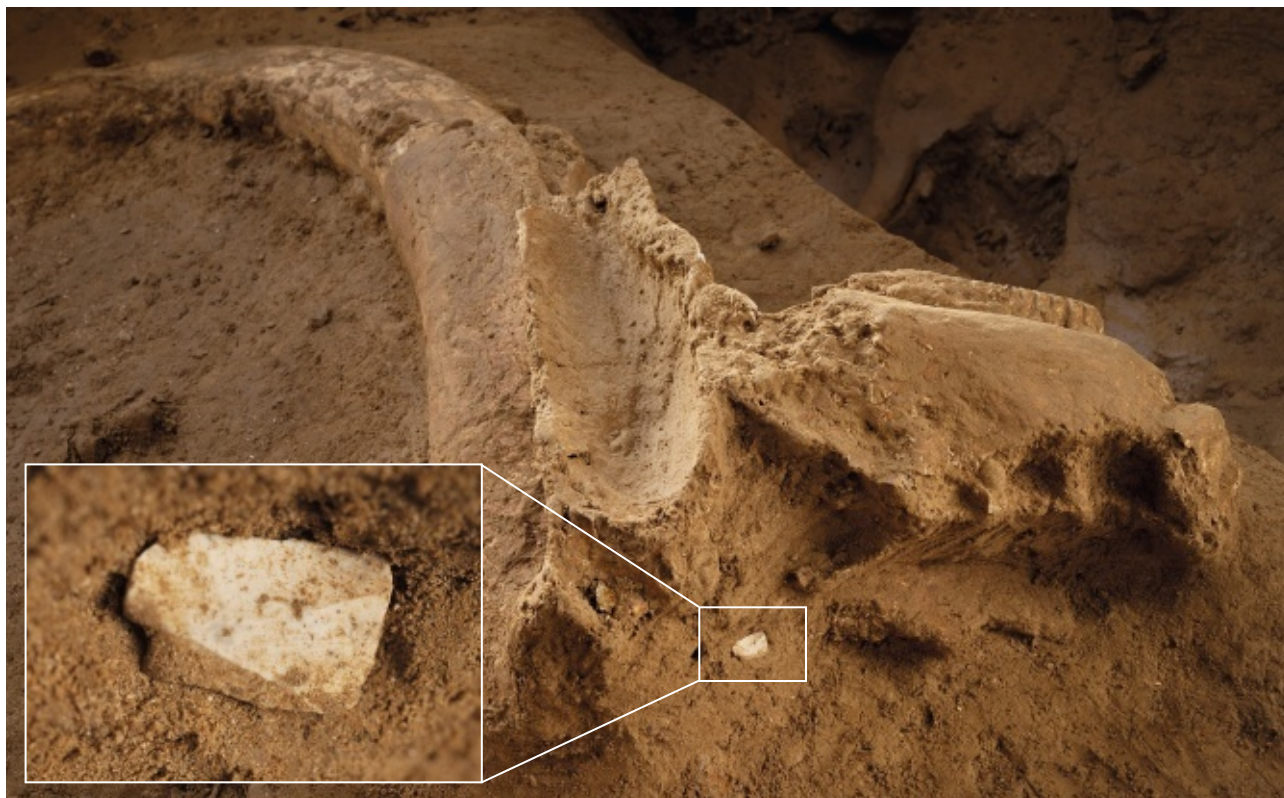




Denis Gliksmann/INRAP

2. IL Y A QUELQUES MOIS, LE SQUELETTE presque complet d'un mammoth a été mis au jour à Changis-sur-Marne par l'équipe de Grégory Bayle, de l'INRAP. Un fragment de silex découvert en contact direct d'un fragment du crâne du mammoth (*zoom*) suggère une inter-

vention humaine sur la carcasse de l'animal. Les paléophysiologistes du Muséum national d'histoire naturelle analysent les ossements dans l'espoir d'y détecter de l'ADN préservé. Le mammoth aurait vécu il y a au moins 130 000 ans.

d'avantage adaptatif au froid. La mutation déstabilise la protéine, de sorte que ceux qui la portent souffrent d'anémie chronique. Pourquoi une telle conséquence chez l'homme ? Cette question reste à éclaircir.

Comparer des populations d'une même espèce

L'adaptation de l'hémoglobine n'est qu'une pièce du puzzle. Pour comprendre comment le mammoth laineux s'est adapté au grand froid, bien d'autres aspects de son adaptation biochimique sont encore à élucider. Sans compter que l'énigme se pose pour des dizaines d'autres espèces éteintes. Toutefois, il est peu probable que l'énorme quantité de génomes anciens séquencés ces dernières années soient d'une grande aide : la technique utilisée pour les obtenir, dite de séquençage aléatoire global, produit un échantillonnage au hasard qui, s'il fournit un tableau d'ensemble, n'est en général pas assez précis ou complet pour une utilisation en paléophysiologie. Seul un tel séquençage

répété de multiples fois serait exploitable, mais le coût en serait exorbitant.

Une nouvelle technique de séquençage, nommée capture sélective par hybridation, permet une meilleure couverture des gènes cibles pour un coût bien moindre : des fragments d'ADN sont capturés spécifiquement par des séquences de nucléotides disposées sur une micropuce – des morceaux de séquence des gènes cibles bien conservés d'une espèce à l'autre, par exemple. Cette technique devrait permettre des études à grande échelle comparant, par exemple, les réseaux de gènes des mammoths de Sibérie, ayant vécu à des périodes interglaciaires plus douces, et ceux de mammoths qui vivaient durant des pics glaciaires, lorsque les glaciers avaient atteint leur épaisseur maximale. On devrait aussi pouvoir comparer des populations d'une même espèce séparées géographiquement, tels les mammoths de Sibérie et ceux d'Amérique (mammoth dit de Colomb). Ce type d'étude non seulement permettrait d'évaluer la diversité génétique au sein d'une espèce, mais fournirait aussi de précieuses informations sur

les nouvelles adaptations physiologiques en réponse aux conditions géographiques et climatiques locales.

Aussi exaltantes que soient ces perspectives (imaginez 50 000 ans d'évolution défilant sous vos yeux), notre capacité à analyser la physiologie des organismes du passé est limitée. Dans l'idéal, les protéines éteintes devraient être étudiées *in vivo*, car nombre de leurs propriétés ne sont perceptibles que dans un organisme vivant. Or il est peu probable que cela soit réalisable à court terme : il faudrait pour cela faire revivre une espèce éteinte.

Pour l'heure, nous devons nous contenter d'observer des protéines anciennes dans des tubes à essai et des cellules en culture. Déjà, nous utilisons ces techniques pour explorer la physiologie d'autres créatures disparues, dont le mastodonte et la rhytine de Steller, un mammifère marin arctique connu aussi sous le nom de vache des mers. Le clonage de ces animaux restera un fantasme pour longtemps encore. En attendant, protéine par protéine, nous continuerons à insuffler la vie, par petites touches, à ces animaux disparus. ■

8^e **SALON**

du livre d'histoire
des sciences et
des techniques

EXPOSITION
ATELIERS
RENCONTRES
TABLES-RONDES
SPECTACLES
LIBRAIRIE

L'ÉNERGIE QUELLE HISTOIRE!

ENTRÉE
LIBRE

du 8 au 10 février 2013
ESPACE ROBESPIERRE
2 rue Robespierre - Ivry-sur-Seine M^o Mairie d'Ivry

Programme complet sur www.ivry94.fr et www.ast.s.asso.fr



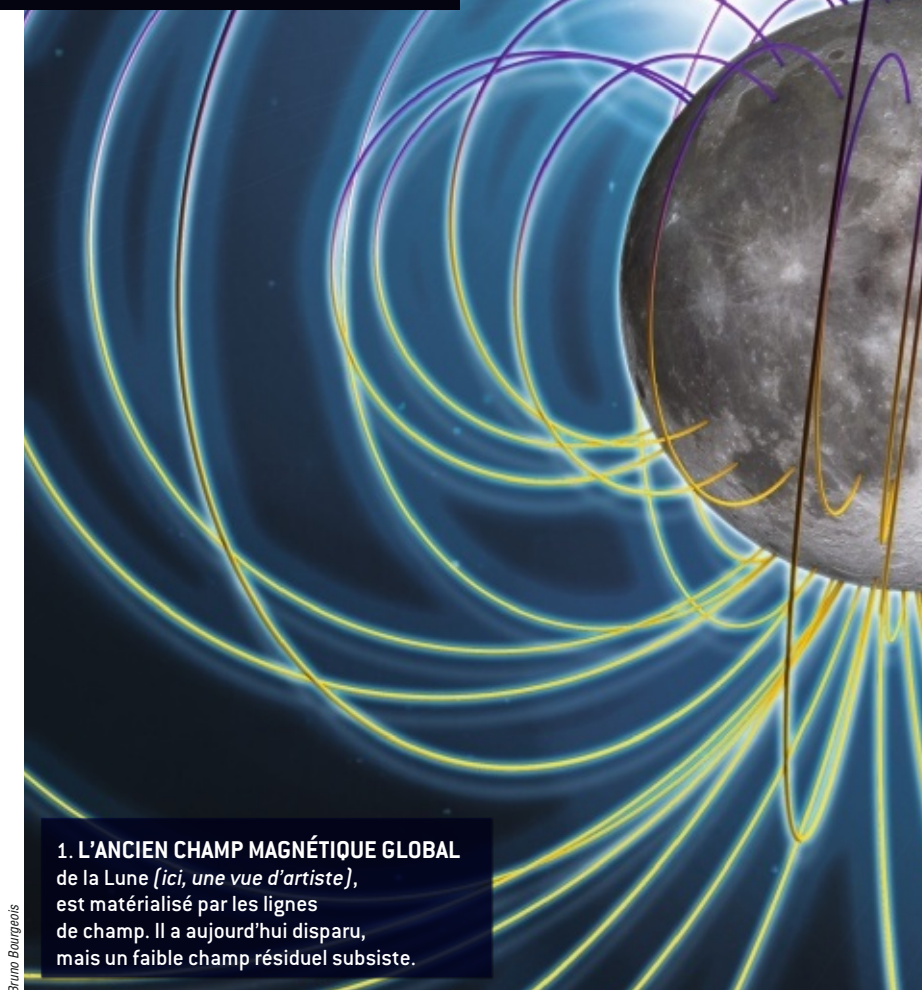
Le magnétisme de la Lune

D. Cébron, M. Le Bars et M. Wieczorek

Les échantillons de roches lunaires rapportés par les missions *Apollo* indiquent que la Lune présentait, dans le passé, un champ magnétique global. Son origine semble très différente de celle du champ magnétique terrestre.

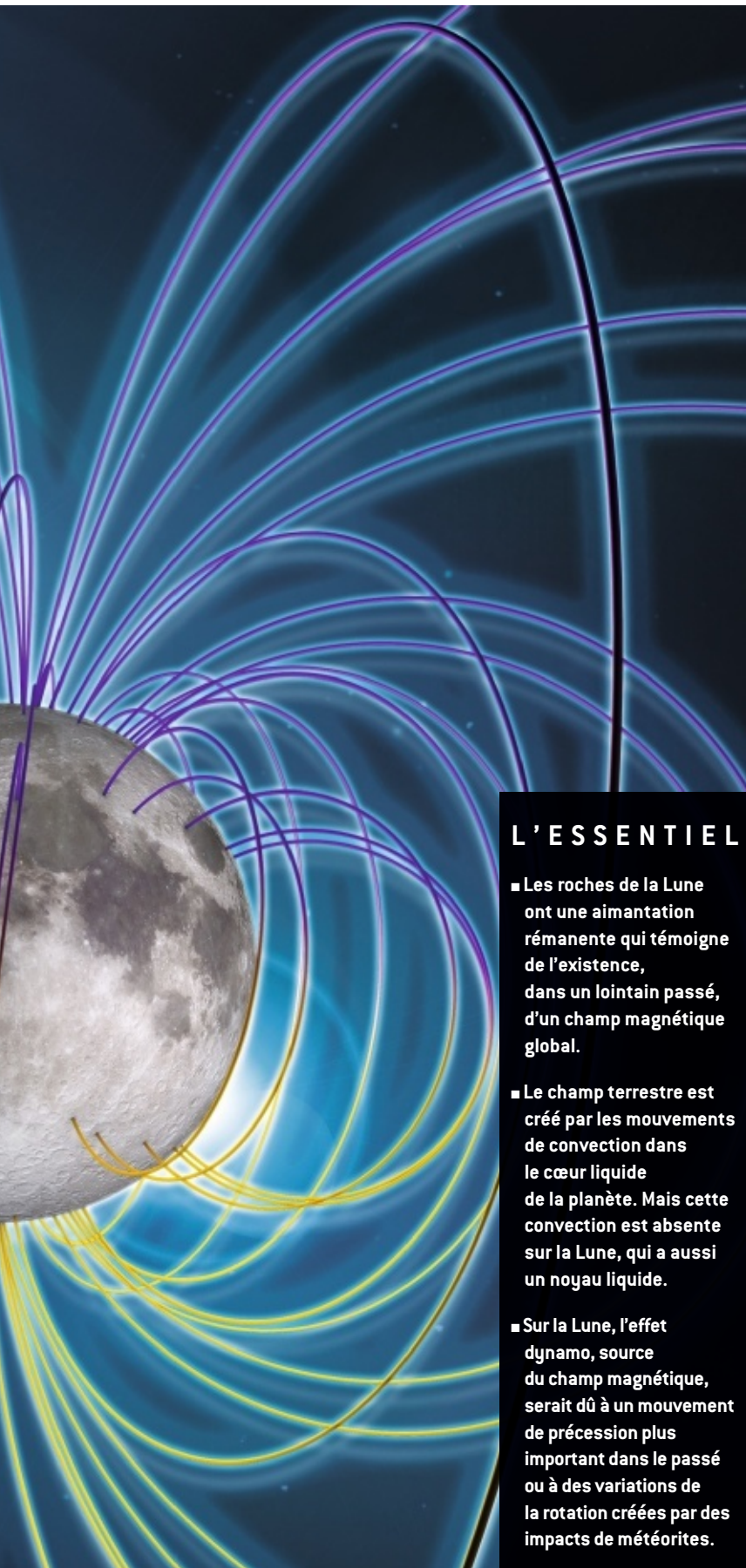
La Lune a-t-elle, comme la Terre, un champ magnétique global ? La réponse est non, ce qui s'accorde avec l'image que l'on a de notre satellite, celle d'un astre mort et froid. Mais plusieurs indices montrent qu'il n'en a pas toujours été ainsi. Dans un lointain passé, la Lune a été pourvue d'un champ magnétique. Comment était-il produit ? Et pourquoi a-t-il disparu ? Les mécanismes connus, tels les mouvements de convection qui agitent la partie liquide du noyau de notre planète, ne peuvent pas expliquer le champ magnétique lunaire. Aussi les scientifiques ont-ils proposé d'autres scénarios.

Le champ magnétique de la Terre nous protège du bombardement des particules chargées en provenance du Soleil et contribue à préserver l'atmosphère. La Terre n'est pas un cas unique ; de nombreuses planètes – Jupiter, Saturne, Uranus ou Neptune – présentent aussi un tel champ. D'autres astres, tels Mars ou la Lune, semblent avoir eu dans leur passé un champ magnétique global. Dans le cas de la Lune, les échantillons de roche rapportés lors des missions *Apollo* présentent des traces d'un champ magnétique datant de plusieurs milliards d'années.



1. L'ANCIEN CHAMP MAGNÉTIQUE GLOBAL de la Lune (*ici, une vue d'artiste*), est matérialisé par les lignes de champ. Il a aujourd'hui disparu, mais un faible champ résiduel subsiste.

Bruno Bézange



L'ESSENTIEL

- Les roches de la Lune ont une aimantation rémanente qui témoigne de l'existence, dans un lointain passé, d'un champ magnétique global.
- Le champ terrestre est créé par les mouvements de convection dans le cœur liquide de la planète. Mais cette convection est absente sur la Lune, qui a aussi un noyau liquide.
- Sur la Lune, l'effet dynamo, source du champ magnétique, serait dû à un mouvement de précession plus important dans le passé ou à des variations de la rotation créées par des impacts de météorites.

Une nouvelle analyse de ces échantillons par des techniques modernes, les missions spatiales récentes vers la Lune ainsi que des expériences de laboratoire et des simulations numériques en magnétohydrodynamique – l'étude des fluides conducteurs d'électricité –, permettent aujourd'hui de lever un coin du voile sur la question de l'origine du champ magnétique global de la Lune. Plusieurs scénarios expliquent comment un tel champ a pu être produit et décrivent l'origine de certaines anomalies observées dans la cartographie du champ résiduel.

Mesurer un champ magnétique

Pour mesurer le champ magnétique d'une planète, les astrophysiciens utilisent des magnétomètres embarqués sur des satellites, tel *Cersted* pour la Terre, ou sur des sondes d'exploration, par exemple *Lunar Prospector* pour la Lune, *Mars Global Surveyor* pour Mars ou encore *Galileo* pour Jupiter. Le champ magnétique d'une planète a deux origines possibles : dynamique, *via* des mouvements de fluides conducteurs dans l'une des couches internes de la planète (par exemple du fer liquide dans le noyau terrestre), ou statique, *via* une aimantation figée des roches de son enveloppe externe. Dans le second cas, il s'agit de la rémanence d'un champ magnétique dynamique qui a disparu au cours de l'évolution de la planète.

On distingue deux mécanismes responsables d'un champ magnétique dynamique. Le premier est lié à la présence proche d'un autre corps céleste qui crée un champ magnétique ambiant. Ce dernier est dévié par les mouvements du fluide interne de la planète, ce qui, par un phénomène d'induction, produit un champ planétaire propre. Le second mécanisme de formation d'un champ magnétique, spontané et autoentretenu, s'appuie sur la conversion de l'énergie cinétique des écoulements fluides en énergie magnétique ; on parle alors d'effet dynamo.

Dans les deux cas, l'intensité et la direction du champ créé présentent de fortes variations temporelles, reliées aux déplacements du fluide conducteur. Cependant, seul un mécanisme de type dynamo est capable d'expliquer un champ magnétique intense comme celui de la Terre. L'effet dynamo est un mécanisme complexe dont la compréhension agite la communauté scientifique depuis plus d'un siècle : l'une des questions fondamentales est d'identifier

ANALYSES PALÉOMAGNÉTIQUES DES ROCHES LUNAIRES

Les échantillons de roches anciennes présentant une aimantation rémanente permettent d'obtenir des informations sur le champ magnétique présent au moment de son enregistrement dans les minéraux de la roche. L'âge de la roche peut être déterminé par datation radiométrique, ou radiodation. Cette méthode de datation absolue exploite la variation régulière au cours du temps de la proportion de radio-isotopes des éléments (par exemple l'argon, l'uranium ou le thorium) que contiennent les minéraux d'une roche. Une fois l'âge déterminé, il s'agit de remonter au champ magnétique présent au moment de l'aimantation de la roche. Pour ce faire, l'aimantation rémanente est tout d'abord mesurée avec un magnétomètre de précision. On soumet en-

suite l'échantillon à une succession de désaimantations, par exemple par chauffage, et d'aimantations contrôlées sous champ constant afin de construire un abaque – une courbe de référence – de l'aimantation rémanente en fonction du champ magnétique externe imposé. Le report sur cet abaque de l'aimantation initiale fournit alors une mesure du champ magnétique passé.

Si le principe de la mesure est simple, sa mise en application soulève un grand nombre de difficultés. Il faut en particulier s'affranchir des aimantations parasites de l'environnement pour aboutir à une mesure précise et fiable. En outre, l'échantillon peut résulter d'une histoire géologique complexe ou avoir subi des aimantations successives, par choc ou par chauffage.



Cet échantillon de roche lunaire a été rapporté par la mission *Apollo 17* en 1972. Il a été analysé entre autres par I. Garrick-Bethell et ses collègues en 2009. De façon surprenante, cet échantillon a révélé qu'un champ magnétique intense régnait sur la Lune il y a 4,2 milliards d'années.

■ LES AUTEURS

David CÉBRON est postdoctorant à l'École polytechnique fédérale de Zurich, en Suisse.

Michael LE BARS est chargé de recherche au CNRS à l'Institut de recherche sur les phénomènes hors équilibre de Marseille.

Mark WIECZOREK est directeur de recherche au CNRS à l'Institut de physique du globe de Paris.

les mouvements fluides pouvant donner lieu à une dynamo, et le moteur de ces écoulements (voir l'encadré page 39).

Ainsi, sur Terre, le champ magnétique global est produit par la convection dite thermosolutale, liée à la fois au refroidissement de la Terre et à la solidification progressive de la partie interne du noyau, la « graine ». Ce champ est surtout dipolaire, avec des pôles magnétiques Nord et Sud reliés par des lignes de champ selon lesquelles s'alignent les boussoles, par exemple. Mais il présente aussi des fluctuations spatiales et temporelles : il peut parfois s'inverser, le pôle Nord magnétique devenant le pôle Sud, et inversement. La première preuve de l'origine convective de la dynamo terrestre et des renversements associés du champ magnétique a été apportée en 1995 par les simulations numériques des géophysiciens américains Gary Glatzmaier et Paul Roberts. Leur étude a ouvert la voie à de nombreux travaux et modèles de plus en plus élaborés, qui cherchent à reproduire les particularités du champ terrestre ou à expliquer, par un même mécanisme de dynamo convective, les champs magnétiques actuels de Mercure et de Ganymède (une lune de Jupiter), ou ceux de Mars et de la Lune, aujourd'hui disparus.

L'une des particularités de ce mécanisme est le renversement du champ magnétique. Certains minéraux ferromagnétiques, présents au sein des roches terrestres, mettent en évidence ce phénomène. Ces matériaux s'aimantent dans le sens du champ magnétique ambiant et conservent cette aimanta-

tion même après la disparition du champ extérieur. On parle d'aimantation rémanente. Ces aimants permanents peuvent acquérir leur aimantation de différentes façons : sur Terre, la plus commune est l'aimantation thermorémanente, acquise lors du refroidissement après un chauffage intense. Une partie du champ magnétique ambiant est enregistrée dans la roche lorsque la température de celle-ci redescend au-dessous d'un certain seuil, la température de Curie.

La roche : témoin d'un champ magnétique

Ce phénomène est à l'origine de l'aimantation des roches volcaniques sur les flancs des volcans ou au niveau des dorsales océaniques. D'ailleurs, en 1963, Lawrence Morley, Frederick Vine et Drummond Matthews ont utilisé l'alternance d'orientation du champ rémanent des roches du plancher océanique atlantique – associé au renversement des pôles – et leur symétrie par rapport à l'axe de la dorsale pour prouver le phénomène d'expansion océanique, un élément clef dans le modèle de la tectonique des plaques.

L'aimantation rémanente est aussi utile en archéologie. Les matériaux ferromagnétiques contenus dans les argiles travaillées au feu (céramiques, fours, etc.) enregistrent l'orientation du champ magnétique lors de leur dernier chauffage. En mesurant ce champ rémanent, on parvient alors à dater ces vestiges.

À l'échelle d'une planète, les roches réparties à sa surface et présentant une

aimantation rémanente produisent un champ magnétique de faible intensité, avec d'importantes fluctuations locales en amplitude et en direction, mais constant dans le temps. C'est ce type de champ magnétique que l'on observe sur la Lune aujourd'hui.

Cartographie du champ rémanent lunaire

Les données obtenues lors des survols de la Lune par les missions spatiales telles que la sonde américaine LRO (*Lunar Reconnaissance Orbiter*), lancée en 2009, indiquent que le champ magnétique actuel à la surface de la Lune est figé et de faible intensité – il est environ 5000 fois inférieur au champ magnétique à la surface de la Terre. Il provient donc de l'aimantation rémanente des roches de la croûte (*voir la figure 2*).

Un champ magnétique rémanent est le vestige d'un champ magnétique global aujourd'hui disparu. Pour que ce champ global ait aimanté la roche lunaire, celle-ci a dû atteindre des températures élevées. Par quel phénomène ?

L'échauffement ayant conduit à l'aimantation mesurée est attribué aux impacts météoritiques : lors de la chute d'une météorite, la zone d'impact subit une élévation intense de température, avant de se refroidir lentement. Au début, l'agitation thermique empêche la roche de développer une aiman-

BIBLIOGRAPHIE

R. C. Weber *et al.*, **Seismic detection of the lunar core**, *Science*, vol. 331, pp. 309-312, 2011.

C. A. Dwyer *et al.*, **A long-lived lunar dynamo driven by continuous mechanical stirring**, *Nature*, vol. 479, pp. 212-214, 2011.

M. Le Bars *et al.*, **An impact-driven dynamo for the early Moon**, *Nature*, vol. 479, pp. 215-218, 2011.

I. Garrick-Bethell *et al.*, **Early lunar magnetism**, *Science*, vol. 323, pp. 356-359, 2009.

L. L. Hood et N. A. Artemieva, **Antipodal effects of lunar basin-forming impacts : initial 3D simulations and comparisons with observations**, *Icarus*, vol. 193, pp. 485-502, 2008.

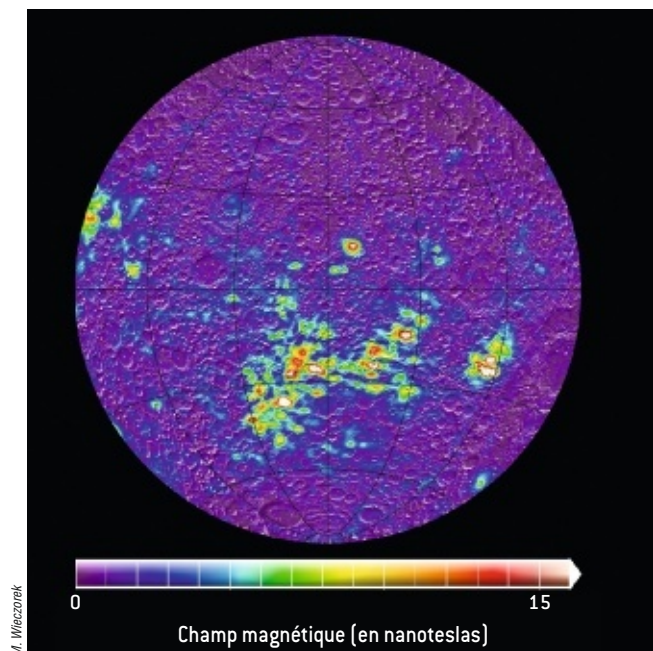
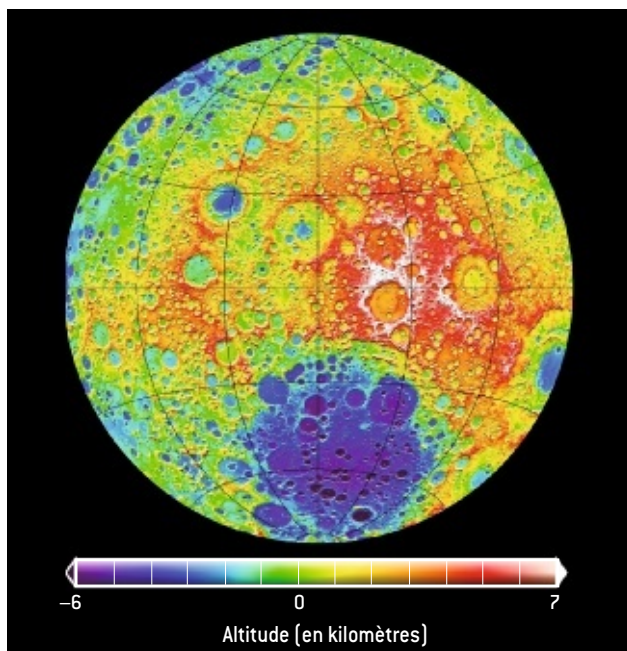
A. Tilgner, **Precession driven dynamos**, *Physics of Fluids*, vol. 17, 034104, 2005.

G. Glatzmaier et Peter Olson, **La géodynamo : une histoire turbulente**, *Pour la Science*, n° 331, mai 2005.

tation stable. Mais après une durée qui peut atteindre une centaine de milliers d'années, selon la puissance de l'impact météoritique et la profondeur considérée, la température des roches repasse au-dessous de la température de Curie : l'agitation thermique devient assez faible pour que l'aimantation se fige et s'aligne sur le champ magnétique externe (*voir la figure 3*). Le champ rémanent actuel résulte de la superposition de l'ensemble des aimantations enregistrées dans la croûte au fil des multiples impacts qui ont ponctué l'histoire de la Lune : il varie beaucoup sur de petites échelles de distance, et il n'existe aujourd'hui pas de champ global. Le magnétisme rémanent de la croûte ne permettrait donc pas à un astronaute de s'orienter avec une boussole !

Les cartes du champ magnétique de la Lune mettent aussi en évidence des régions où le champ rémanent est plus intense, surtout au sein de six grands cratères d'impact ainsi qu'aux antipodes de quatre grands bassins d'impact. L'existence de ces anomalies du champ rémanent peut aussi être expliquée à partir de collisions avec des météorites (*voir l'encadré page 38*).

Les mesures effectuées depuis l'espace fournissent une information instantanée sur l'état actuel du magnétisme rémanent, mais elles ne donnent aucune information sur l'origine du champ magnétique global : provenait-il de la Lune elle-même ? De la



2. CARTES DU RELIEF ET DU CHAMP MAGNÉTIQUE de la face cachée de la Lune. Ce côté est plus exposé aux bombardements de météorites, qui ont formé de nombreux cratères (*à gauche*). Le champ

magnétique rémanent (*à droite*) est faible sur l'ensemble de la surface, à l'exception de certaines anomalies qui correspondent à des cratères ou aux antipodes d'un impact de météorite.

Les anomalies du champ rémanent

Grâce au bombardement massif par des météorites, les roches ont enregistré le champ magnétique global de la Lune (voir la figure 3 ci-dessous). Les impacts météoritiques permettraient aussi d'expliquer certaines des anomalies magnétiques observées sur la carte du champ rémanent lunaire actuel (voir la figure 2). Plusieurs zones, situées aux antipodes de certains grands cratères, présentent un champ d'intensité plus élevé.

Les simulations numériques réalisées en 2008 par Lon Hood (Université de l'Arizona) et Natalia Artemieva (Université de Tucson, États-Unis, et Institut de dynamique de la géosphère de

l'Académie des sciences à Moscou) montrent qu'à la suite d'un impact important, un immense nuage de plasma se forme. Les particules de matière éjectée acquièrent une charge électrique et leur mouvement crée des courants électriques transitoires ainsi que des champs magnétiques au sein du nuage. Ce dernier, très bon conducteur, est aussi sensible au champ magnétique déjà existant (par exemple celui du vent solaire) ; il l'amplifie soit en concentrant ce champ dans l'onde de choc à la frontière du nuage, soit par confinement entre le nuage et le manteau supérieur lunaire faiblement conducteur.

Quand le nuage arrive aux antipodes – en environ une heure –, le champ magnétique peut être amplifié d'un facteur allant jusqu'à 100. En retombant, les débris de roche présents dans le nuage constituent autant de chocs possibles, qui font fondre le sol, lequel enregistre le champ magnétique intense sur une zone réduite.

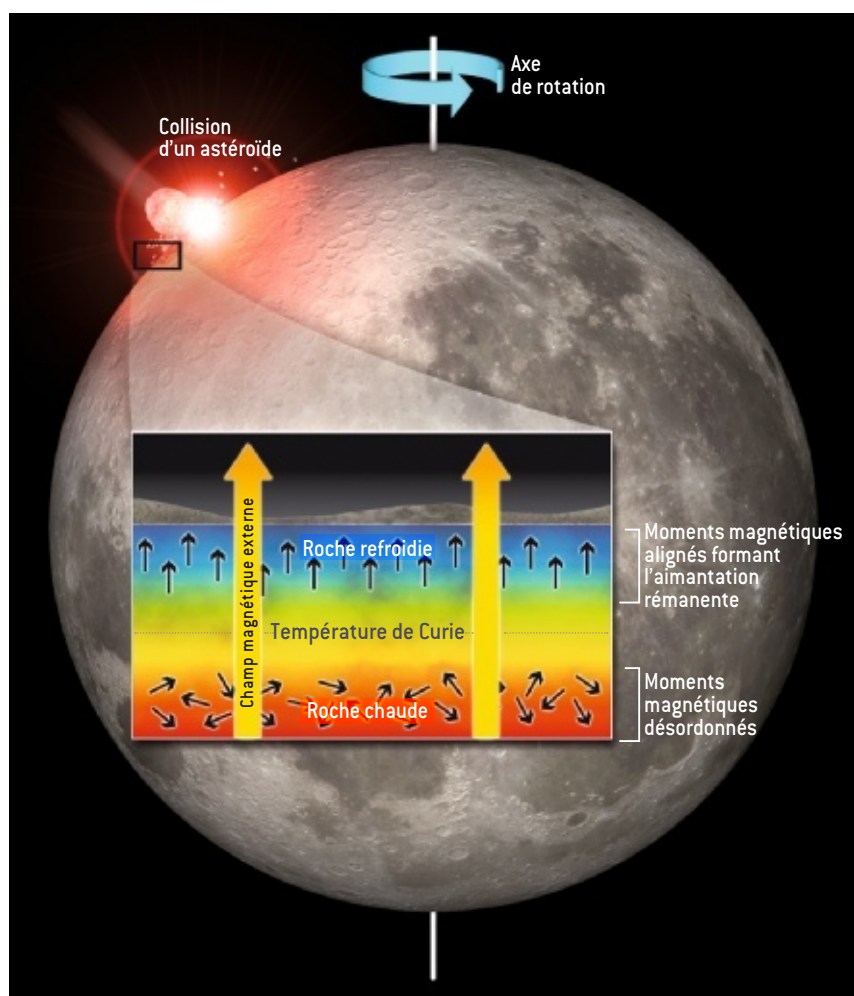
Ce mécanisme explique une partie des anomalies magnétiques observées, mais il n'explique pas l'intégralité de l'aimantation rémanente des roches lunaires. L'existence d'un mécanisme de dynamo interne à la Lune semble indispensable.

Terre ? Était-il lié à un mécanisme d'induction ou de dynamo ? Les échantillons de roches rapportés lors des missions *Apollo* complètent les mesures spatiales et aident à répondre à ces questions. Leur analyse permet de déterminer, par radiodation, le temps écoulé depuis que la roche s'est solidifiée et d'estimer, par une série de désaimantations et d'aimantations contrôlées, l'amplitude du champ ambiant à l'époque (voir l'encadré page 36). Ces mesures, en particulier celles réalisées en 2009 par Ian Garrick-Bethell, de l'Université de Californie à Santa Cruz, et ses collègues indiquent que les roches les plus aimantées se sont formées dans un intervalle de quelques millions d'années, il y a environ quatre milliards d'années, en présence d'un champ magnétique intense, compris entre 1 et 100 microteslas (celui de la surface de la Terre est de l'ordre de 50 microteslas). Cette période correspondrait, selon certains scénarios, à une époque où la surface de la Lune était intensément bombardée par des météorites qui ont permis, en faisant fondre les roches, d'y enregistrer le champ magnétique ambiant.

Un tel champ magnétique, du même ordre de grandeur que celui à la surface de la Terre aujourd'hui, était trop important pour être dû à un phénomène d'induction. Ainsi, la Lune était dotée de son propre champ magnétique, produit par un mécanisme de dynamo, dont il reste à expliquer l'origine.

Le mystère de la dynamo lunaire enfin résolu ?

Un premier élément de réponse a été apporté par Renee Weber, du Centre de vol spatial Marshall de la NASA, à Huntsville aux États-Unis, et ses collègues. Ces chercheurs ont repris en 2011 les données sismiques recueillies par les quatre sismomètres déployés sur la Lune lors des missions *Apollo*. Ces mesures avaient déjà permis, dans les années 1970, d'évaluer l'épaisseur de la croûte lunaire à environ 50 kilomètres et de prévoir l'existence d'une couche riche en métaux à la base du manteau lunaire. En appliquant des méthodes modernes d'analyse, l'équipe de R. Weber a fourni la première preuve de la présence d'un noyau liquide sous la surface lunaire, à 1 400 kilomètres de profondeur. La Lune actuelle, que l'on pouvait croire entièrement solide, possède aujourd'hui encore un cœur



3. L'AIMANTATION RÉMANENTE APPARAÎT SUITE À UNE COLLISION D'UN ASTÉROÏDE, qui fait fondre la roche en profondeur. Lorsque la température est élevée, le moment magnétique des atomes n'a pas de direction privilégiée. L'agitation thermique empêche les moments de s'aligner sur le champ magnétique global. Après le choc, la température de la roche diminue et passe sous la température de Curie : les moments s'alignent alors tous sur le champ externe.

liquide de métal conducteur. La température élevée dans le cœur viendrait de la présence d'éléments radioactifs – comme c'est le cas d'une partie de l'énergie entretenant le cœur liquide terrestre. Le liquide conducteur est l'ingrédient principal pour obtenir un effet dynamo. Il faut cependant que le liquide soit parcouru de mouvements turbulents pour créer un champ magnétique.

Par analogie avec la Terre, Dave Stegman, de l'Université de Californie à Berkeley, et ses collègues ont proposé en 2003 que la dynamo de la Lune résultait d'un mécanisme de convection. Cependant, du fait de sa petite taille, la Lune s'est refroidie en quelques centaines de millions d'années

après sa formation, ce qui a arrêté tout phénomène convectif : dans ces conditions, le scénario d'une dynamo par convection est peu réaliste. Pour expliquer une éventuelle dynamo lunaire, il faut trouver une autre source de mouvements dans son noyau.

En 2011, notre équipe européenne et une équipe américaine ont proposé simultanément, mais de façon indépendante, que l'énergie nécessaire à ces mouvements pouvait être apportée par la rotation de la Lune, suivant une idée proposée dès 1968 par Willem Malkus, de l'Université de Californie à Los Angeles. Cependant, il est possible de prouver qu'un mouvement de rotation en bloc d'un noyau liquide, qui suit la rotation

du manteau, est trop simple pour amorcer un effet dynamo. Comment obtenir des écoulements intenses et turbulents ?

Une première possibilité provient du mouvement de précession de l'axe de rotation de la Lune. Au fil du temps, l'axe de rotation d'une planète ou d'un satellite change lentement de direction, et décrit un cône autour de la perpendiculaire au plan de son orbite. Par exemple, l'axe de rotation de la Terre, incliné d'environ 23 degrés, décrit un tel cône en environ 26 500 ans, ce qui est à comparer aux cinq degrés d'obliquité de la Lune et à sa période de précession de 18,6 ans. La précession d'une planète peut exciter des instabilités hydrodynamiques à

L'EFFET DYNAMO : UN DÉFI THÉORIQUE, EXPÉRIMENTAL ET NUMÉRIQUE

Un champ magnétique planétaire de grande échelle est créé grâce aux écoulements des fluides conducteurs d'électricité, tels ceux du noyau liquide terrestre. Ce mécanisme est nommé effet dynamo, car, comme pour la dynamo d'un vélo, un champ magnétique et un courant électrique naissent d'un mouvement. Le mécanisme de dynamo fluide, proposé par le physicien irlandais Joseph Larmor dès 1919, nécessite des écoulements particuliers et suffisamment vigoureux pour compenser son amortissement par effet Joule – dissipation de l'énergie en chaleur.

Malgré de nombreux travaux, ce problème magnétohydrodynamique reste assez mal compris et son étude demeure un défi, que ce soit pour l'approche théorique, expérimentale ou numérique. En fait, les travaux théoriques n'ont pas permis d'obtenir de conditions générales d'existence de l'effet dynamo. Au contraire, des théorèmes dits antidynamo stipulent que des écoulements trop simples ne produisent pas de champ magnétique. Les écoulements doivent être complexes, et très peu de modèles théoriques ont pu être développés à ce jour.

À ces difficultés s'ajoute celle de reproduire l'effet dynamo dans une expérience contrôlée. En effet, les fluides très conducteurs utilisables à l'échelle du laboratoire, tels que le mercure ou le sodium, sont dangereux et donc difficiles à manipu-

ler : le mercure est neurotoxique et le sodium réagit de façon explosive en présence d'eau. Cela impose des mesures de précaution drastiques. Par ailleurs, la force et la complexité des écoulements nécessaires imposent de construire des expériences

semaines d'intervalle, un effet dynamo a été obtenu dans un écoulement contraint pendant quelques dizaines de secondes à Riga, juste avant qu'une fuite de sodium liquide ne mette fin à l'expérience. Un autre effet dynamo a été obtenu

Enfin, l'expérience VKS (pour *Von Karman Sodium*), développée par l'École normale supérieure de Paris et celle de Lyon et par le CEA à Saclay, a produit en septembre 2006 la première dynamo fondée sur un écoulement libre et turbulent, produit par des disques tournants. Ce dispositif a mis en évidence des renversements du champ magnétique. D'autres projets sont en cours : dans le Maryland et à Madison, aux États-Unis, et à Dresde, en Allemagne.

Enfin, l'étude de l'effet dynamo par le biais de simulations numériques est tout aussi complexe. Elle nécessite la résolution simultanée du système d'équations non linéaires couplées de la magnétohydrodynamique pour des écoulements complexes et rapides. Malgré l'utilisation des méthodes numériques les plus performantes et des supercalculateurs les plus puissants, les régimes de paramètres des planètes et des étoiles restent inaccessibles aux simulations. Ces études ont néanmoins remporté quelques succès tels que la reproduction numérique d'un effet dynamo produit par des écoulements convectifs, de son caractère dipolaire et de ses inversions, comme c'est le cas au sein du noyau terrestre actuel. Plus récemment, en 2005, la simulation d'Andreas Tilgner, de l'Université de Göttingen, en Allemagne, a montré qu'il est possible de créer un effet dynamo à partir de la précession d'une cavité fluide en rotation.



L'expérience de l'Université du Maryland est constituée de deux sphères imbriquées – la plus grande ayant un diamètre de trois mètres. La géométrie s'approche des conditions régnant au sein d'une planète. Elle devrait permettre de reproduire un champ magnétique du type de celui de la Terre à partir de l'effet dynamo.

de grande dimension, mues par de puissants moteurs capables de produire des vitesses d'écoulement importantes.

À ce jour, la reproduction de l'effet dynamo fluide n'a été réussie que par trois expériences différentes. Tout d'abord, en 1999, à quelques

heures. Pour donner une idée des contraintes pesant sur ce type d'expériences, l'ensemble du dispositif de Karlsruhe a nécessité cinq ans d'élaboration, coûté quelque sept millions d'euros et occupait trois étages d'un bâtiment dédié.