

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.



NASA/Johnson Space Center photograph S73-19456

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 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

■ 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.

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.

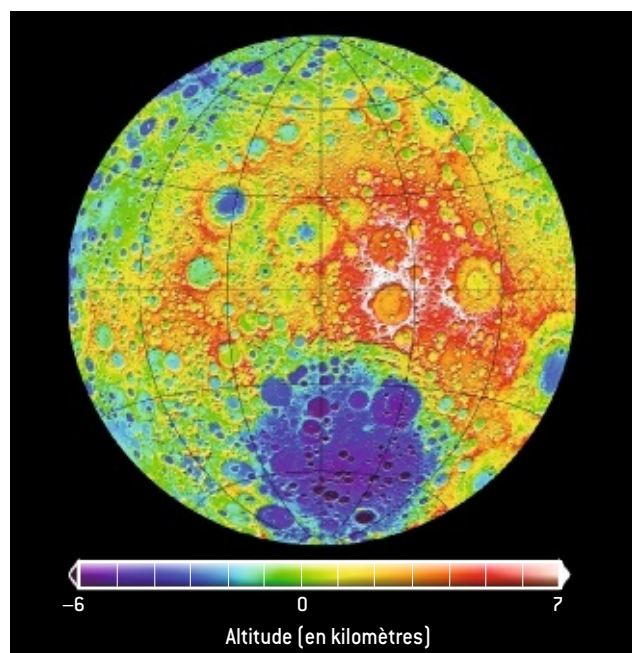
A. Tilgner, **Precession driven dynamos**, *Physics of Fluids*, vol. 17, 034104, 2005.

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

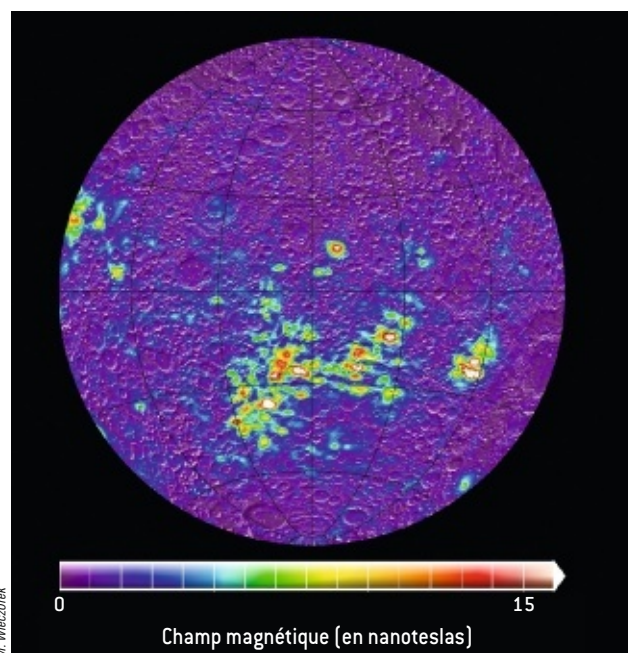
tation stable. Mais après une durée qui peut atteindre une centaine de milliers d'années, selon la puissance de l'impact météoritique et la profondeur considérée, la température des roches repasse au-dessous de la température de Curie : l'agitation thermique devient assez faible pour que l'aimantation 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.