

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.

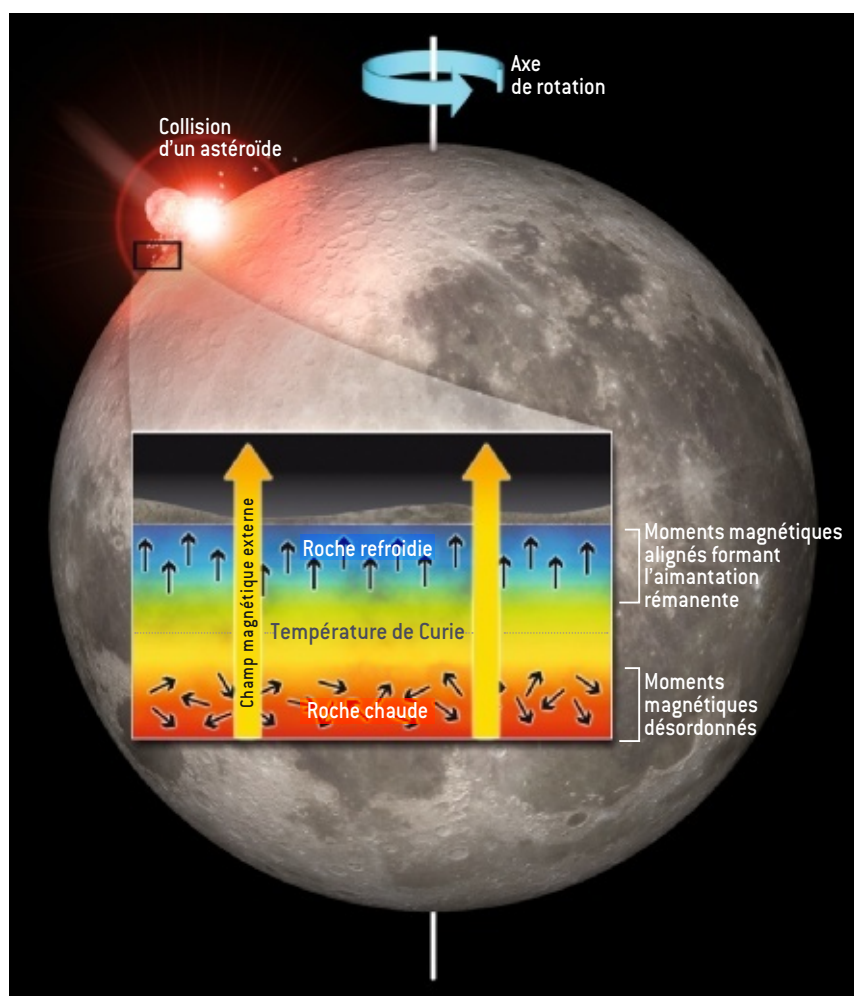
Ce mécanisme explique une partie des anomalies magnétiques observées, mais il n'explique pas l'intégralité de l'aimantation rémanente des roches lunaires. L'existence d'un mécanisme de dynamo interne à la Lune semble indispensable.

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



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.

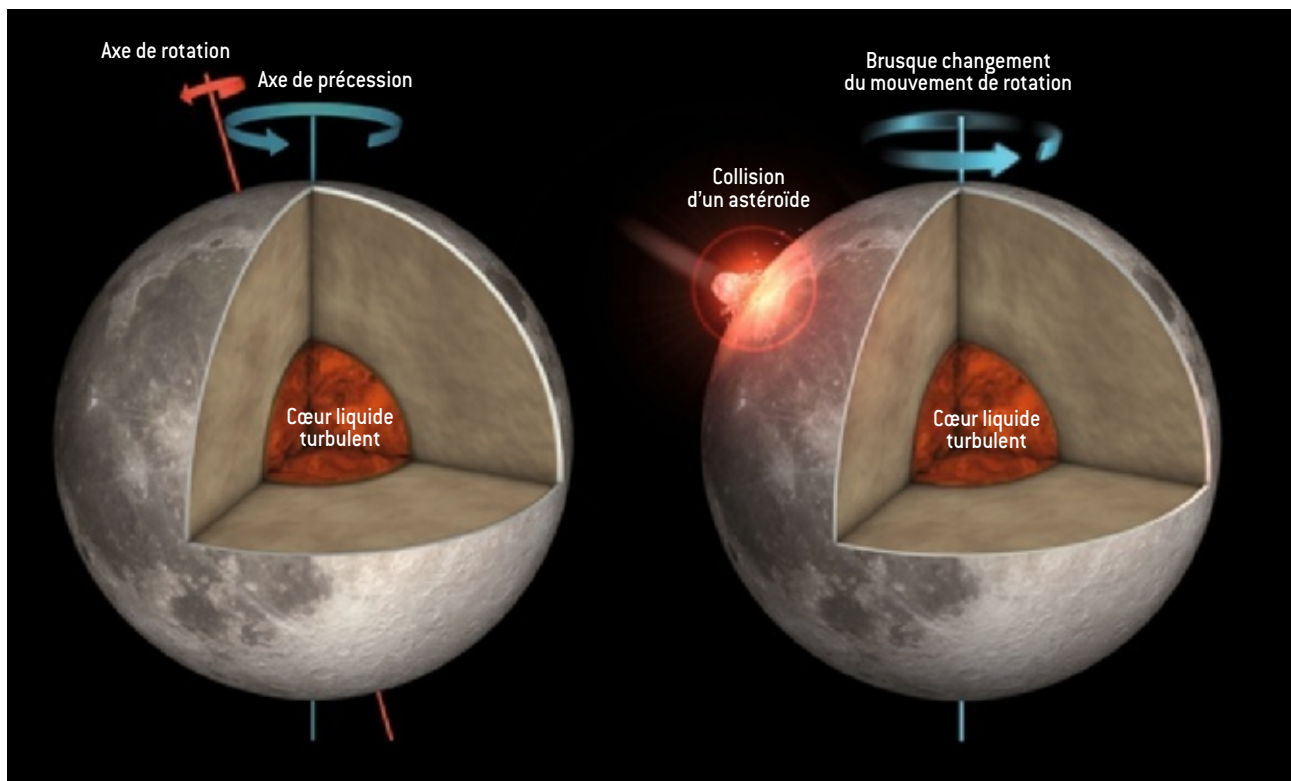
de grande dimension, mues par de puissants moteurs capables de produire des vitesses d'écoulement importantes.

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

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.



Bruno Bourgeois

4. LES MODÈLES DE DYNAMO LUNAIRE nécessitent la production de turbulences dans le cœur liquide du satellite. Une possibilité est que, peu après la formation de la Lune, le mouvement de précession – de l'axe de rotation de la Lune, qui décrit un cône – aurait pu être assez intense, avec une forte inclinaison et une vitesse de rotation élevée, pour créer des turbulences (à gauche). L'équipe des auteurs a mis en évidence une autre

possibilité, fondée sur l'instabilité elliptique. La Lune a une forme légèrement elliptique du fait de l'attraction terrestre. Une variation dans la vitesse de rotation, due à la collision avec une météorite, peut créer des mouvements turbulents dans le cœur de la Lune (à droite). Les données actuelles ne permettent pas de préciser les rôles respectifs de ces mécanismes, qui pourraient d'ailleurs être complémentaires.

l'origine d'écoulements turbulents dans le noyau liquide tout entier, selon l'influence de trois paramètres essentiels : une vitesse de précession élevée, un angle de précession important ou un fort aplatissement aux pôles (comme pour la Terre, la rotation d'une planète sur elle-même déforme la sphère, qui s'aplatit aux pôles et forme un renflement à l'équateur). L'effet dynamo de ce type d'écoulement a été prouvé en 2005 par les simulations numériques de Andreas Tilgner, à l'Université de Göttingen, en Allemagne.

En 2011, Christina Dwyer, de l'Université de Californie à Santa Cruz, et ses collègues ont étudié un tel scénario de dynamo par précession dans le cas de la Lune. Leurs résultats montrent que la précession actuelle ne peut alimenter une dynamo lunaire. Mais les conditions de rotation ont pu être différentes par le passé. En effet, la Lune est issue d'une collision gigantesque entre la Terre primitive et un planétoïde de la taille de Mars, survenue 42 millions d'années à peine après la naissance du Système solaire. La Lune s'est ensuite formée par accrétion d'une partie des débris de

la collision, éjectés dans l'espace sur une orbite très proche de la Terre.

Soumise à des rotations propre et orbitale très rapides ainsi qu'à des forces gravitationnelles intenses exercées par la Terre, la Lune était alors sujette à des mouvements de précession plus marqués autour d'un angle d'inclinaison plus grand, voire à des basculements de son axe de rotation.

La dynamo lunaire activée par la précession

Il y a environ quatre milliards d'années, un effet dynamo aurait ainsi persisté pendant quelques centaines de millions d'années, jusqu'à ce que la Lune s'éloigne assez de la Terre et voie ses mouvements de rotation et de précession s'atténuer progressivement, pour finalement atteindre le calme relatif de sa situation actuelle.

Les impacts météoritiques pourraient aussi être un vecteur de conversion de l'énergie de rotation de la Lune en déplacements fluides dans son noyau. La Lune a subi de nombreux impacts au cours

de son histoire, en particulier durant la période du « grand bombardement tardif », entre 4,1 et 3,9 milliards d'années. À cette époque, la Lune était déjà, comme aujourd'hui, en rotation synchrone : elle tourne sur elle-même dans le même temps qu'elle accomplit une révolution autour de la Terre, lui présentant ainsi toujours la même face. Certains cratères lunaires atteignant 700 kilomètres de diamètre ont été produits par des météorites de quelques dizaines de kilomètres de rayon voyageant à plusieurs kilomètres par seconde. Ils témoignent de collisions assez puissantes pour avoir désynchronisé pendant un certain temps la rotation de la Lune autour de la Terre. Par ailleurs, en raison des forces gravitationnelles intenses exercées par la Terre, la Lune a une forme elliptique un peu allongée dans la direction de la Terre. Pour étudier ces phénomènes, notre équipe (Institut de recherche sur les phénomènes hors équilibre à Marseille, Institut de physique du globe de Paris et l'Observatoire royal de Belgique), a utilisé des expériences de laboratoire, des simulations numériques et

des modèles théoriques. En 2011, nous avons montré que dans cette configuration, une désynchronisation sous l'effet d'un impact crée des mouvements fluides qui pourraient avoir excité une instabilité hydrodynamique dite elliptique, rendant l'écoulement turbulent et donc favorable à l'effet dynamo. Le champ magnétique présent sur la Lune il y a quatre milliards d'années aurait ainsi pu résulter d'une succession d'épisodes de dynamo associés aux turbulences dues aux impacts. Le champ magnétique lié à chaque impact aurait alors eu une durée de vie d'une dizaine de milliers d'années, échelle de temps nécessaire à la Lune pour se synchroniser de nouveau.

Des scénarios complémentaires

Ainsi, le champ magnétique lunaire résulte sans doute de mécanismes qui puisent leur énergie dans la rotation de la Lune ou dans les impacts météoritiques. Ces deux modèles de dynamo lunaire sont assez séduisants, car ils expliquent pourquoi

le champ magnétique a pu exister dans le passé et avoir aujourd'hui disparu.

Loin de s'exclure mutuellement, ces mécanismes sont d'ailleurs compatibles, voire complémentaires. Ainsi, un champ magnétique continu pourrait avoir été engendré par une dynamo de précession, à laquelle se seraient superposées des périodes transitoires où le champ magnétique était plus intense en raison de l'impact d'une météorite. Pour distinguer ces différents mécanismes ou établir leur chronologie, il faudrait disposer d'un jeu de données paléomagnétiques précis et complet, échantillonné sur toute la surface et sur toute l'histoire de la Lune. Ce qui serait difficilement réalisable.

Les différents modèles proposés soulèvent de nouvelles questions. Par exemple, l'origine de l'instabilité hydrodynamique de précession reste mal connue, et la production d'un champ magnétique par ce biais n'a été caractérisée que dans des configurations limitées et peu turbulentes, accessibles aux simulations numériques. Une expérience magnétohydrodynamique visant à compléter ces résultats est actuelle-

ment en cours de développement à Dresde, en Allemagne. De même, le modèle de dynamo produit par l'instabilité elliptique est sans doute correct, mais il reste à le prouver, par exemple par des simulations numériques. L'absence de symétrie de révolution, hypothèse souvent exploitée pour mener à bien les simulations, impose de développer de nouvelles approches pour aborder la magnétohydrodynamique dans une géométrie ellipsoïdale.

Ces différents scénarios, développés pour expliquer le magnétisme lunaire, ont en outre une portée plus générale. Ils montrent que les modèles développés pour comprendre la Terre ne sont pas transposables. Contrairement à ce qui a longtemps été admis, la présence d'un champ magnétique planétaire n'implique pas toujours des mouvements de convection au sein d'une couche fluide interne. Comme pour la Lune, d'autres mécanismes seront sans doute nécessaires pour comprendre les champs magnétiques de Mercure, de Ganymède ou des planètes extrasolaires, voire de certains gros astéroïdes. ■



france culture

LA MARCHÉ DES SCIENCES

Découvertes, inventions, aventures savantes au fil de l'Histoire

Aurélie Luneau
14h-15h / chaque jeudi

franceculture.fr

en partenariat avec **POUR LA SCIENCE**

© 2013 France Culture. Tous droits réservés. Photo: M. Drouot - M. Drouot / M. Drouot. 2013. Photo: M. Drouot - M. Drouot / M. Drouot. 2013.

La lutte biologique, stratégie durable



1. DES COCONS D'UNE GUÊPE PARASITOÏDE
sont accrochés au dos d'une chenille. La guêpe pond ses œufs dans le corps de la chenille, où les larves se développent avant de percer la cuticule et de former leurs cocons. À l'inverse des parasites, les parasitoïdes tuent leur hôte en se développant. Ils sont très utilisés dans la lutte biologique.