

celui du noyau, ce qui produit une rotation différentielle. En outre, certains impacts majeurs au commencement de l'histoire lunaire pourraient avoir eu un effet similaire (voir les figures pages 30-31).

Les dynamos d'origine mécanique sont encore assez peu étudiées, mais les changements de paramètres orbitaux nécessaires à leur fonctionnement ne permettent pas d'expliquer l'existence d'un champ magnétique durant plus de 1 milliard à 2 milliards d'années. Il faut donc recourir à des dynamos liées au refroidissement et à la cristallisation de la graine, la partie solide du noyau, pour expliquer l'existence d'un champ magnétique persistant. Le champ terrestre, par exemple, dépend principalement de la cristallisation de la graine. L'existence d'un champ magnétique sur la Lune il y a environ 4 milliards d'années peut s'expliquer par le refroidissement initial du satellite, mais l'amplitude de ce champ et sa persistance pendant une période prolongée sont difficiles à expliquer ainsi, du fait de la petite taille de la Lune.

En 2009, Ian Garrick-Bethell, de l'université de Californie à Santa Cruz, a examiné des échantillons rapportés des missions *Apollo* à l'aide de techniques plus sensibles que lors des analyses précédentes. Il a montré l'existence d'un champ supérieur à 1 microtesla il y a 4,2 milliards d'années. En effet, lorsque de la roche fondue se refroidit, les moments magnétiques des atomes s'alignent sur le champ magnétique global. Ce dernier imprime alors sa trace dans la roche sous la forme d'un champ rémanent. Le champ global

aurait donc perduré quelques centaines de millions d'années et son amplitude a varié par au moins deux ordres de grandeur (entre 1 et 100 microteslas ; il est d'environ 50 microteslas sur Terre). Selon certains scénarios, ce champ pourrait même avoir persisté 2 milliards d'années supplémentaires, mais les roches lunaires enregistrent assez mal le champ magnétique et les valeurs de champ attendues par ces scénarios sont trop proches du seuil de sensibilité des dispositifs expérimentaux pour être détectés.

Une dynamo lunaire d'origine inconnue

Le champ magnétique lunaire aurait ainsi connu une période ancienne, mais brève, où il avait une forte amplitude, suivie d'une période potentiellement longue associée à une faible amplitude. Comment concilier la durée, l'amplitude et l'extrême variabilité d'un tel champ avec les modèles d'évolution interne de la Lune ?

La prise en compte de la présence d'eau dans le manteau (voir l'encadré page 32), de la croissance d'une graine, de l'entraînement mécanique dû à des variations orbitales ou d'une collision avec un astéroïde ont permis d'expliquer certaines observations, mais aucun de ces phénomènes ne donne naissance à un champ de longue durée. De plus, la question de l'amplitude reste ouverte. L'intensité du champ magnétique à la surface dépend directement de la taille du noyau qui engendre ce champ. Or le champ lunaire ancien semble être aussi

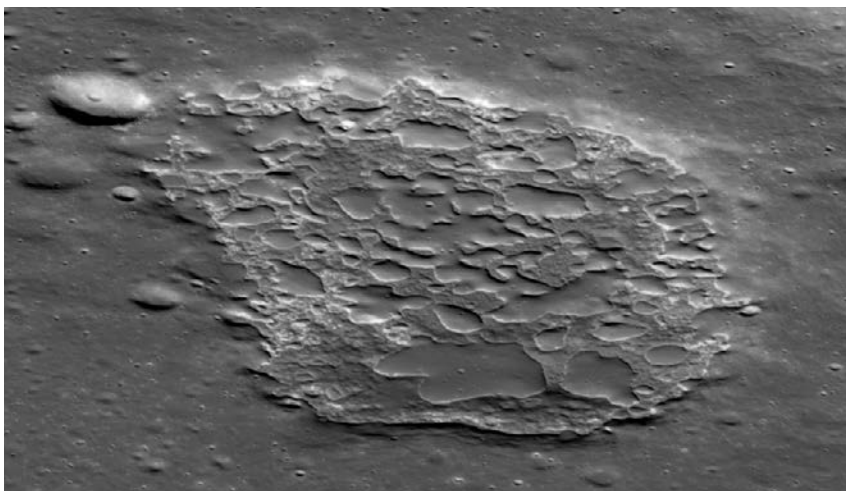
important que le champ magnétique terrestre aujourd'hui, bien que le noyau lunaire soit probablement dix fois plus petit que celui de la Terre relativement à sa taille.

L'histoire complète du champ magnétique lunaire est encore loin d'être écrite. Une meilleure compréhension de la structure interne et de l'évolution du manteau fournira des contraintes plus sévères sur les modèles. Une meilleure couverture temporelle des données, avec notamment la détermination de la période où la dynamo s'est arrêtée, sera aussi un grand atout pour concevoir un modèle cohérent.

Un autre aspect des sciences lunaires qui doit être repensé du fait d'observations récentes est celui de l'activité magmatique. En 2014, grâce aux images de haute résolution obtenues par la mission LRO (*Lunar Reconnaissance Orbiter*), Sarah Braden, de l'université d'État de l'Arizona, et ses collègues ont rapporté la découverte de près de 70 anomalies topographiques ressemblant très fortement à des structures volcaniques avec des coulées de lave (voir la figure ci-dessous). Les astronomes se sont fondés sur le nombre de cratères de météorites qui recouvrent ces régions pour dater les volcans : leur faible nombre suggère que ces formations volcaniques sont très récentes, âgées de moins de 100 millions d'années. Si cela est confirmé, il faudra comprendre par quels mécanismes la chaleur des volcans est produite. En effet, la plupart des modèles actuels expliquent seulement une activité volcanique qui aurait plus de 1 milliard d'années.

Parmi les pistes alternatives qui restituent correctement la durée du volcanisme lunaire et sa distribution à la surface du satellite, deux scénarios sont fondés sur la constatation que l'activité volcanique lunaire est fortement corrélée avec une région de la face visible, Procellarum KREEP Terrane, qui est riche en éléments radioactifs (KREEP est un acronyme précisant les éléments en questions : le potassium, K, les terres rares, REE – pour *Rare Earth Elements* en anglais –, et le phosphore, P). Les deux modèles se distinguent par leur interprétation de l'enrichissement en éléments radioactifs de la région : sont-ils la cause ou la conséquence de l'activité volcanique ?

Les éléments radioactifs sont aussi des éléments incompatibles dont nous avons parlé précédemment et qui restent dans l'océan de magma résiduel lors de la cristallisation. Après refroidissement, ils se sont accumulés dans une couche plus dense que

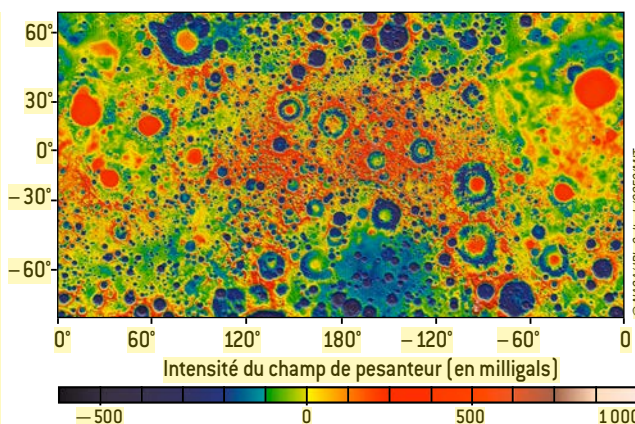


NASA/GSFC/université d'État de l'Arizona

INA EST UNE COULÉE DE LAVE BASALTIQUE de deux kilomètres de large, photographiée pour la première fois lors de la mission *Apollo 15*. Son âge était estimé à moins de 100 millions d'années, mais son caractère unique faisait penser à une anomalie. La sonde LRO a, depuis, découvert 70 épanchements de lave similaires : la Lune a eu une activité volcanique récente !

DES SONDES JUMELLES POUR AUSCULTER LA CROÛTE LUNAIRE

En 2012, la Nasa a envoyé les deux sondes jumelles de la mission GRAIL (pour *Gravity Recovery And Interior Laboratory*) en orbite autour de la Lune. En mesurant les variations de distance entre les deux sondes qui suivaient la même trajectoire, les chercheurs ont obtenu une cartographie très précise du champ de gravité lunaire. En couplant ces observations à des mesures topographiques, les planétologues ont amélioré leur connaissance de la croûte de la Lune. Les propriétés globales de la croûte sont le résultat direct du processus de cristallisation de l'océan de magma, et donc de la composition globale de la Lune. La précision inégalée de la mission GRAIL a permis d'améliorer les estimations de l'épaisseur de la croûte. En l'occurrence, les données suggèrent que la densité moyenne est bien plus faible qu'on ne le pensait précédemment, ce qui implique que l'épaisseur moyenne de la croûte, entre 34 et 43 kilomètres, est aussi inférieure à celle qui était attendue. L'une des conséquences directes de ces observations est que la Lune a une concentration en éléments réfractaires (tels les éléments radioactifs) similaire à celle de la Terre.



CARTE DU CHAMP DE GRAVITÉ mesuré par les sondes GRAIL. Elle permet d'identifier des cratères et des bassins où la croûte plus mince correspond à un champ de gravité moins intense (en bleu) et des plateaux où le champ est plus élevé (en rouge).

le manteau sous-jacent, créant ainsi une structure instable. On rejoint ici le scénario proposé pour expliquer l'asymétrie de composition de la croûte : cette couche coule dans le manteau et remonte préférentiellement vers la face visible, en particulier dans la région de Procellarum KREEP Terrane. En remontant, avec la baisse de pression, la couche fond et produit le type de volcanisme attendu en surface. L'un des succès de ce modèle est la temporalité : les coulées les plus anciennes ont au plus 300 millions d'années. Il semble aussi compatible avec l'idée que les éléments plus denses ont tendance à s'enfoncer dans le manteau. En revanche, la composition de ces laves ne correspond pas directement aux observations. Dans ce scénario, on s'attend à ce que les basaltes soient riches en éléments incompatibles, ce qui n'est pas clairement le cas.

Des volcans sur la Lune

Une autre version considère cet enrichissement en éléments radioactifs comme la cause du volcanisme. En supposant que, lors de la réorganisation interne des éléments incompatibles, ils se soient accumulés dans la région de Procellarum, la couche formée aurait chauffé jusqu'à faire fondre la partie supérieure du manteau et produire une activité volcanique locale qui n'a pu durer jusqu'à récemment. Le processus s'étale sur une durée qui correspond aussi au délai d'observation des premières coulées de lave. L'étude d'échantillons ramenés de la surface

lunaire suggère que les éléments radioactifs sont surtout mélangés à la croûte et peu présents dans les coulées de lave, ce qui renforce cette version de l'histoire lunaire.

Aucun des deux scénarios n'est encore pleinement satisfaisant. Dans le premier cas, les conditions pour expliquer la migration des éléments radioactifs sont incertaines. Comme nous l'avons vu, il n'existe pas encore de mécanisme généralement admis permettant d'expliquer la répartition hétérogène des éléments incompatibles sous la croûte lunaire. Un tel modèle est aussi nécessaire pour apporter du poids au second modèle. Par ailleurs, l'évolution du manteau a des conséquences directes sur l'évolution du noyau et donc sur la génération du champ magnétique primordial.

L'histoire de la Lune nous cache-t-elle encore d'autres surprises ? On le saura peut-être bientôt grâce au regain d'intérêt pour l'exploration lunaire. Des missions préparées par les grandes puissances du domaine de l'exploration spatiale pourraient conduire à de grandes découvertes même si elles n'ont pas toutes des objectifs scientifiques.

Les observations de la Lune nous révèlent, pour l'instant, une image incomplète dont les pièces ne s'ajustent pas toujours bien entre elles. Les astronomes ont néanmoins beaucoup progressé, ces dernières décennies, dans leur compréhension du compagnon de la Terre. Et la Lune, qui a longtemps été considérée comme un corps inerte à l'histoire peu palpitante se révèle être un corps céleste actif et fort intrigant. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

M. A. Siegler *et al.*, *Lunar true polar wander inferred from polar hydrogen*, *Nature*, vol. 531, pp. 480-484, 2016.

M. Touboul *et al.*, *Tungsten isotopic evidence for disproportional late accretion to the Earth and Moon*, *Nature*, vol. 520, pp. 530-533, 2015.

B. P. Weiss et S. M. Tikoo, *The lunar dynamo*, *Science*, vol. 346, n° 6214, 2014.

D. Cébron *et al.*, *Le magnétisme de la Lune*, *Pour la Science*, n° 424, février 2013.

M. A. Wieczorek *et al.*, *The crust of the Moon as seen by GRAIL*, *Science*, vol. 339, n° 6120, 2013.

M. Ohtake *et al.*, *Asymmetric crustal growth on the Moon indicated by primitive farside highland materials*, *Nature Geoscience*, vol. 5, pp. 384-388, 2012.

M. Cuk et S. T. Stewart, *Making the Moon from a fast-spinning Earth : A giant impact followed by resonant despinning*, *Science*, vol. 338, n° 6110, 2012.