

HOMO SAPIENS INFORMATICUS chronique de Gilles Dowek

Le dilemme moral de la voiture autonome

Programmer un robot qui sera confronté à des décisions complexes nous oblige à expliciter nos choix éthiques.



Un dilemme moral est une situation dans laquelle nous devons faire un choix qui nous mène, dans tous les cas, à commettre une mauvaise action. Par exemple, si nous devons faire le choix entre voler un médicament pour soigner un malade et ne pas aider ce dernier, nous avons deux mauvaises actions possibles : voler ou laisser souffrir le malade. Dans une telle situation, le problème qui se pose à nous n'est plus celui de faire le bon choix, mais de faire le moins mauvais.

Les réflexions sur le moins mauvais choix sont cependant parfois perçues comme un peu artificielles, car elles mènent à des conclusions difficilement utilisables en pratique.

Par exemple, imaginons qu'un groupe d'enfants traverse, sans prévenir, une route de montagne sur laquelle roule une voiture. Le conducteur n'ayant plus le temps de freiner, son choix est soit d'écraser les piétons, soit de jeter sa voiture dans le précipice. Face à un tel dilemme, s'il y a davantage de piétons sur la route que de passagers dans la voiture, le moins mauvais choix est sans doute de jeter sa voiture dans le précipice, afin d'épargner le plus grand nombre de vies possible.

Or peu de conducteurs réagissent effectivement ainsi. Et il n'est pas difficile d'expliquer cette incohérence entre leurs valeurs – qui devraient les mener à limiter le nombre de victimes de l'accident – et leurs actions : faiblesse de la volonté, prépondérance de l'instinct de survie, difficulté d'appréhender la situation dans sa globalité, brièveté du temps imparti à la décision, etc.

Toutefois, ces réflexions sont probablement moins artificielles aujourd'hui que naguère. De nombreux véhicules – ascenseurs, métros, drones, etc. – n'ont en effet plus de conducteur et d'autres – trains, avions, voitures – n'en auront plus dans un avenir plus ou moins proche. De ce fait, quand nous concevons un tel véhicule autonome (voir l'article pages 46 à 51), en particulier quand nous concevons son logiciel de pilotage, nous



SELON QUELS CRITÈRES un véhicule autonome devra-t-il prendre une décision juste avant un accident inévitable ?

devons décider de ce que fera ce véhicule quand il identifiera un groupe de piétons sur la route, s'il n'a plus le temps de freiner et s'il n'a d'autres possibilités que d'écraser les personnes ou de se jeter dans le précipice.

Ce choix doit désormais être explicite dans le logiciel de pilotage : ici comme ailleurs, programmer un ordinateur exige d'explicitier l'implicite.

Contrairement à la situation précédente, la décision ne doit pas être prise sur le

coup, mais au moment de la conception du logiciel de pilotage du véhicule, c'est-à-dire longtemps à l'avance. Nous avons donc tout le temps d'y réfléchir sereinement et il n'est plus possible d'invoquer la difficulté de décider dans le feu de l'action pour justifier une incohérence entre nos valeurs et nos actions.

En décidant de sauver les passagers de la voiture plutôt que les piétons, nous ne faisons, dans le premier cas, que commettre une mauvaise action. Dans le second, nous faisons plus : nous déclarons aussi publiquement notre intention de la commettre. Ce qui n'était qu'une incapacité de décider dans l'instant, une faiblesse de la volonté, etc., sans doute pardonnables, devient le plus froid des cynismes.

Cette obligation d'explicitier nos intentions dans les logiciels change donc complètement le rapport de la pensée éthique à l'action. Et il est possible qu'après des siècles d'incohérence entre nos belles valeurs et nos moins belles actions, l'évolution des techniques nous contraigne à les accorder. Cette explicitation nous mènera à changer nos actions, mais sans doute aussi nos valeurs. Maintenant que ces dernières nous engagent réellement, nous devons sans doute les définir avec plus d'honnêteté.

Et une telle mise en cohérence de nos valeurs et de nos actions porte un nom : cela s'appelle un progrès moral. ■

Gilles DOWEK est chercheur à l'Inria et membre du conseil scientifique de la Société informatique de France.

La Lune

Une histoire pleine de surprises

Matthieu Laneuville

Comment s'est formée la Lune ? Les dernières découvertes montrent que l'histoire de notre satellite naturel est bien plus étonnante qu'on ne le pensait : intense champ magnétique primordial, volcanisme encore récent, basculement de l'axe... Le passé de notre compagnon céleste est à revoir.

L'ESSENTIEL

- Selon la plupart des planétologues, la Lune est née d'une collision entre la Terre et une planète, Théia.
- Ce scénario doit être affiné pour rendre compte d'analyses récentes de roches lunaires et de certaines observations.
- Différence de composition des faces visible et cachée, existence d'un champ magnétique primordial, volcanisme récent... : autant de phénomènes que les modèles de l'origine de la Lune et de son évolution doivent expliquer.

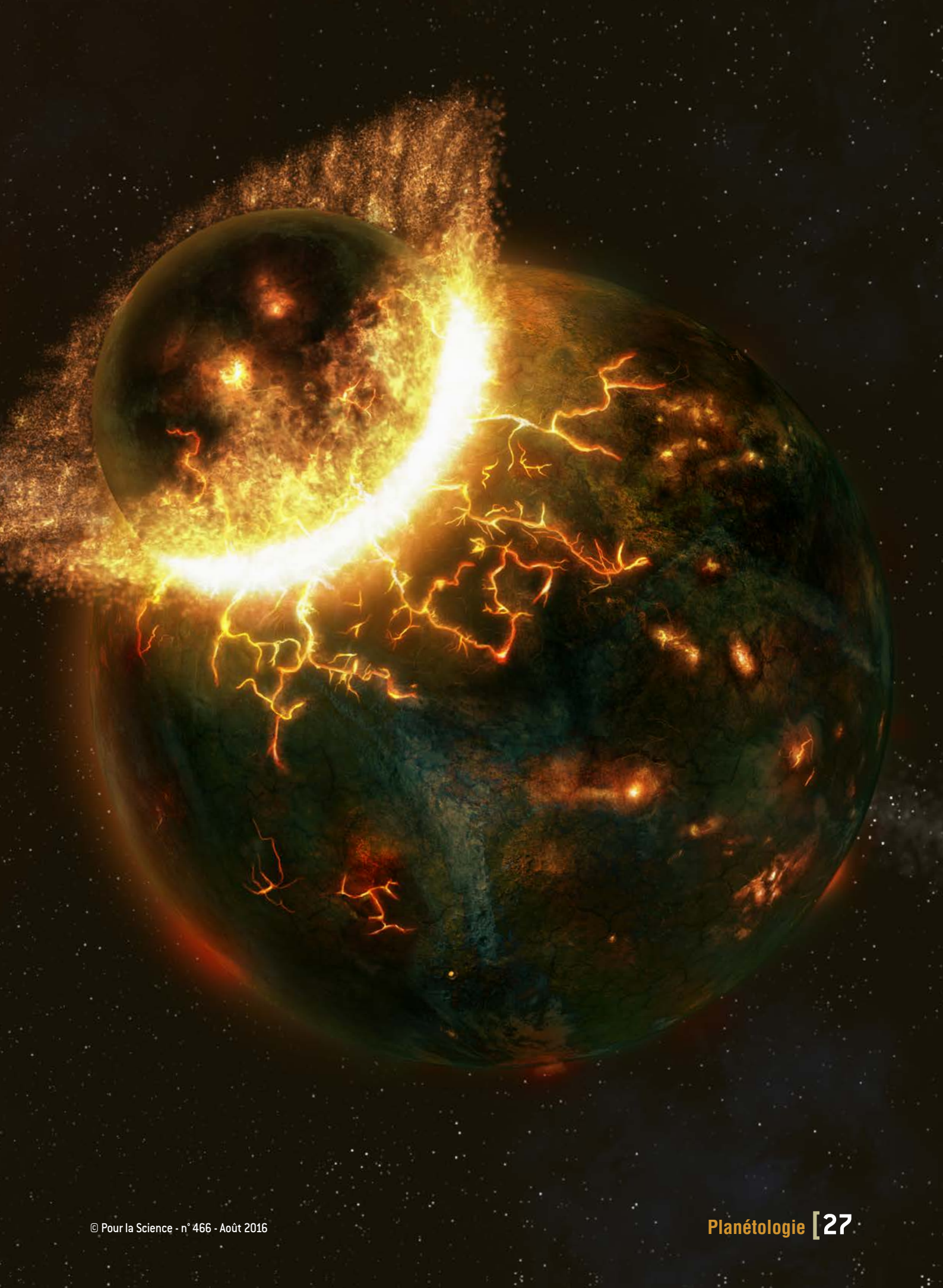
© Fahad Sulehria/www.novalisestia.com

Dans toutes les cultures, passées ou actuelles, la Lune tient une place particulière. Sa proximité de la Terre, son cycle mensuel alternant croissants, nouvelle lune et pleine lune, ont alimenté de nombreux mythes et croyances. Elle a aussi inspiré de nombreux artistes. En 1650, dans *Histoire comique des États et Empires de la Lune*, Savinien de Cyrano de Bergerac se mettait en scène tel un voyageur partant à la rencontre des habitants de la Lune, les Sélénites. Ce nom puise son origine dans la mythologie grecque, de Séléné, la déesse et personnification de la Lune.

Les espoirs de Cyrano de Bergerac d'aller sur la Lune se sont réalisés dans les années 1960-1970 avec les missions *Apollo*, un programme aux enjeux à la fois politiques et scientifiques. Les astronautes ont rapporté de ces expéditions des centaines de kilogrammes d'échantillons lunaires (voir la photographie page 29). Témoins de l'histoire géologique du satellite, ces roches ont permis aux planétologues de reconstituer les grandes étapes de la formation de la Lune. Mais ces dernières années, de nouvelles données ont montré que le passé de la Lune réservait des surprises.

Avant même de découvrir ces derniers développements, les chercheurs savaient que la Lune était un objet unique en son genre. Le rapport de sa taille et de celle de la Terre est le plus élevé parmi tous les couples planète-satellite du Système solaire et, par ailleurs, sa densité est relativement faible pour un objet de cette taille. Le Système solaire se serait formé il y a 4,6 milliards d'années lors de l'effondrement

LA LUNE SERAIT NÉE d'une collision entre la Terre primordiale, couverte d'un océan de magma, et d'une autre planète, surnommée Théia. Les découvertes récentes permettent d'affiner ce scénario.



d'un nuage moléculaire géant, qui a donné naissance au Soleil et aux planètes. Mais certaines analyses indiquent que la Lune se serait constituée 100 millions d'années plus tard. Comment expliquer ce décalage?

Le scénario privilégié est celui d'une collision entre la Terre et une planète hypothétique nommée Théia, la mère de Séléné dans la mythologie grecque. Néanmoins, les spécialistes continuent de débattre sur les différents aspects de ce modèle, et ces discussions se sont multipliées à la lumière des observations les plus récentes. Comment expliquer que la composition de la Lune et celle de la Terre soient si proches? Quels sont les processus qui ont conféré à la Lune un champ magnétique intense pendant plus de 1 milliard d'années après sa naissance? Et comment expliquer que la Lune présente un volcanisme relativement récent? Grâce à des données nouvelles ou plus précises, les chercheurs commencent à esquisser des réponses aux énigmes de l'histoire lunaire.

Le premier épisode de cette histoire est celui de l'événement qui a donné naissance à la Lune. La collision catastrophique Terre-Théia n'est pas le seul scénario ayant été envisagé. Par exemple, en 1879, George Darwin (l'un des fils de Charles Darwin) avait suggéré que le satellite s'était formé par fission de la Terre à une époque où elle tournait très vite sur elle-même, la force centrifuge ayant provoqué une éjection d'une partie du manteau dans l'espace.

La Lune exerce des forces de marée sur la Terre, qui ont tendance à ralentir le mouvement de rotation de la planète. Cela implique que par le passé, lors de la formation de la Lune, la Terre tournait beaucoup plus rapidement sur elle-même. Pour déterminer cette vitesse, il faut prendre en compte la conservation du moment cinétique, ou moment angulaire, du système Terre-Lune. Cette grandeur physique décrit l'état général de rotation d'un système et est conservée – en l'absence de perturbation extérieure, elle garde la même valeur au cours du temps. Le ralentissement de la rotation de la Terre dû aux forces de marée tendrait à diminuer le moment cinétique du système Terre-Lune, mais il est compensé par l'éloignement de la Lune.

De ce fait, la Lune aurait été plus de dix fois plus proche de la Terre à l'époque

■ L'AUTEUR



Matthieu
LANEUVILLE
est professeur
assistant
à l'Institut
des sciences
de la Terre et de la vie, rattaché
à l'Institut de technologie
de Tokyo, au Japon.

Le
scénario
privilégié de la
formation lunaire
par une collision
n'est pas exempt
de défauts

de sa formation, très probablement à une distance de l'ordre de quelques rayons terrestres, contre 60 actuellement. On en déduit que la durée d'une journée sur la Terre était d'environ cinq heures, valeur trop élevée pour que le modèle de George Darwin soit plausible.

Parmi les autres idées proposées pour expliquer la formation de la Lune, figure celle de la capture par le champ gravitationnel terrestre d'un corps formé ailleurs dans le Système solaire. Ce scénario a été en vogue jusque dans les années 1980. Cependant, les premières analyses des échantillons ramenés par les missions *Apollo* et les missions soviétiques *Luna* ont montré que la Terre et la Lune présentent une composition très proche, ce qui est difficile à expliquer si la Lune s'était formée dans une autre région du Système solaire (la composition des planètes semble très hétérogène, ne serait-ce que si l'on compare celles de la Terre et de Mars, par exemple).

Une autre possibilité serait un scénario de coaccrétion: la Terre et la Lune se seraient formées au même endroit et en même temps. Mais plusieurs arguments contredisent cette hypothèse. Même si les compositions des manteaux terrestre et lunaire sont très proches, elles présentent quelques différences, portant en particulier sur la concentration du fer. Lors de l'accrétion des débris qui ont formé un corps tel que la Terre ou la Lune, la structure interne s'est différenciée en un noyau de fer liquide et un manteau. La quantité totale de fer du corps contrôle la taille de son noyau. Or, du fait de sa faible densité, la Lune aurait un noyau plus petit, en proportion, que la Terre. Pour un modèle de coaccrétion, la taille relative des noyaux devrait être comparable. Et dans ce scénario, le moment cinétique du système Terre-Lune devrait être plus élevé qu'il ne l'est.

Le scénario de la collision Terre-Théia semble donc le plus prometteur. L'idée a été proposée en 1974 par les Américains William Hartmann et Donald Davis. Ils ont suggéré que la Lune était née de la collision de la Terre en formation avec une planète de taille comprise entre celle de la Lune et celle de Mars. Cette collision aurait vaporisé en partie les deux corps, homogénéisant leur composition. Les débris

ont alors formé un disque protolunaire autour de la Terre, puis ils se sont agglomérés pour former la Lune. C'est, depuis quelques décennies, le scénario privilégié par les chercheurs, car il permet d'expliquer une partie des observations que les autres scénarios échouent à expliquer. Il s'agit cependant du scénario le « moins pire » : il n'est pas exempt de défauts.

À partir des années 1980, des planétologues ont simulé numériquement des collisions et ont confirmé que la Lune a pu se former ainsi. Les contraintes de ces modèles étaient principalement l'obtention du bon moment cinétique et de la bonne masse finale pour la Terre et la Lune. Ces exigences étaient satisfaites en considérant une collision oblique avec une masse pour Théia de l'ordre de celle de la planète Mars. Cependant, selon ces simulations, Théia contribuait pour 10 % à la masse de la Terre et pour 70 à 90 % à la masse de la Lune. Ces conditions ne permettaient pas aux matériaux des deux corps de bien se mélanger et il n'était donc pas possible d'expliquer l'extraordinaire similitude de composition de la Terre et de la Lune.

Les premières analyses comparées du manteau terrestre et du manteau lunaire, en particulier de l'oxygène et de ses différents isotopes, laissaient malgré tout planer le doute. Elles indiquaient une composition proche, mais les incertitudes étaient assez importantes. Or, depuis une dizaine d'années, les mesures ont gagné en précision et ont été effectuées sur des éléments de plus en plus nombreux. Elles ont confirmé cette similitude de composition, d'où une « crise isotopique ».

Comment résoudre cette crise ? Plusieurs hypothèses ont été esquissées pour concilier les observations et les simulations. Si l'hétérogénéité du Système solaire est plus limitée que prévu, l'impacteur pourrait avoir une composition assez proche de celle de la Terre. En outre, des simulations montrent qu'un objet de composition légèrement différente peut intervenir dans la formation de la Lune sans toutefois entraîner de variations détectables dans les concentrations isotopiques finales. Dans les années à venir, les chercheurs espèrent obtenir des données supplémentaires sur la composition de divers corps du Système solaire (comètes, astéroïdes, Vénus, Mercure...) qui amélioreront la vision de l'histoire des éléments et de leur répartition.

Pour résoudre la « crise isotopique », une autre possibilité serait que la Lune



CET ÉCHANTILLON DE ROCHE LUNAIRE, rapporté par la mission *Apollo 17* en 1972, a permis de montrer que la Lune présentait un champ magnétique intense il y a 4,2 milliards d'années. Par ailleurs, les roches lunaires indiquent que la Lune et la Terre présentent des compositions très similaires.

se soit formée principalement à partir du manteau terrestre et non de l'impacteur. Cela implique de réviser les conditions dans lesquelles se déroule le scénario d'impact.

Un impact plus violent que prévu

Une piste prometteuse a été proposée en 2012 : Matija Cuk, de l'institut SETI, et Sarah Stewart, alors à l'université Harvard, ont proposé un mécanisme qui provoque une diminution progressive du moment cinétique du système Terre-Lune par des effets de résonance gravitationnels entre l'orbite de la Terre autour du Soleil et celle de la Lune autour de la Terre. Grâce à ce mécanisme, la contrainte de la conservation du moment cinétique dans les simulations est moins sévère et autorise des impacts plus violents, dont il résulte un moment cinétique initial plus important. Une nouvelle génération de modèles a donc été proposée. Ces modèles incluent la possibilité d'un impact frontal par un objet de la taille de la Terre ou d'un impact oblique entre un corps de petite taille et la Terre qui tournait très vite sur elle-même.

La conséquence de ces nouveaux modèles est que le nuage de débris à partir duquel la Lune se forme provient désormais surtout du manteau terrestre, ce qui expliquerait la similitude de composition des deux corps tout en justifiant la quantité relativement faible de fer dans l'intérieur de la Lune. En effet, le fer du

noyau terrestre serait trop profond pour se mélanger lors de la collision.

Pour être complet, certains modèles proposent que la composition du disque de débris de la collision, le disque protolunaire, diffère de celle de la Terre, mais certains processus d'interaction du disque avec l'océan de magma terrestre, formé à la suite de l'impact, tendent à homogénéiser la composition des deux corps, en particulier celle des isotopes d'oxygène. Dans ce cas, l'homogénéisation se fait *a posteriori*, après la collision avec Théia.

L'analyse isotopique ne se limite pas à l'oxygène. Par exemple, le couple d'éléments hafnium-tungstène donne des informations sur la date de la collision. L'hafnium 182, instable, se désintègre en tungstène 182 avec une demi-vie de 8,9 millions d'années. L'affinité de ces éléments avec le fer permet de les utiliser comme traceurs de la formation des noyaux terrestre et lunaire. Comme il est peu probable que la composition isotopique des deux manteaux évolue de façon indépendante vers la même valeur, leur comparaison donne des informations sur l'origine des matériaux qui composent les deux corps.

Or, en 2015, Mathieu Touboul, alors à l'université du Maryland, et ses collègues ont montré que, contrairement à ce que l'on pensait jusque-là, la Lune et la Terre présentent une différence en composition isotopique. Sa faible valeur suggère que cette différence provient de processus postérieurs à la formation de la Lune. Une étude approfondie

La Lune se serait formée à la suite d'une collision entre la Terre, couverte d'un océan de magma, et un corps d'une taille comprise entre celle de la Lune et de Mars.

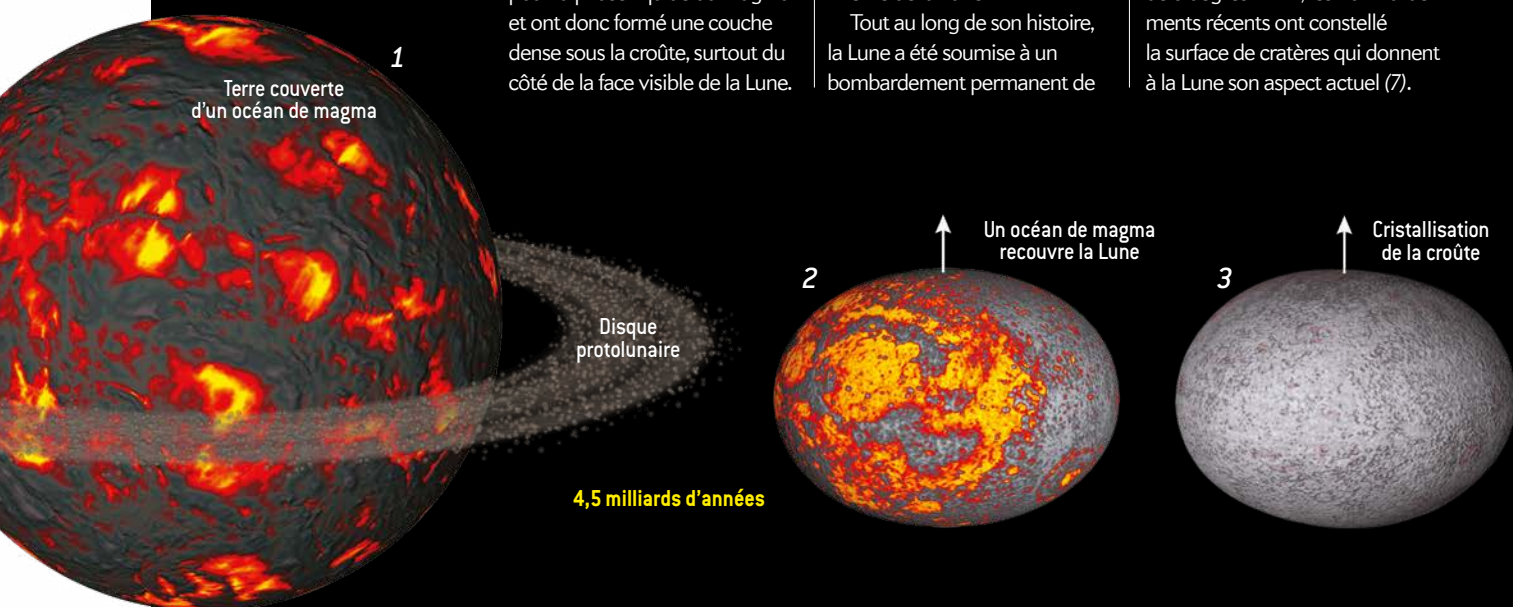
Les débris auraient formé un disque autour de la Terre (1), puis se seraient agglomérés pour constituer la Lune à une distance de 3 à 5 fois le rayon de la Terre. Les effets de marée ont ralenti la rotation de la Terre sur elle-même et ont conduit la Lune à s'éloigner progressivement

jusqu'à atteindre aujourd'hui une distance de 60 rayons terrestres. Quand la Lune s'est formée, sa surface était couverte d'un océan de magma de quelques centaines de kilomètres de profondeur (2). Celui-ci s'est refroidi et a cristallisé (3). Divers éléments, dont des éléments radioactifs tels que le potassium, ont une préférence pour la phase liquide du magma et ont donc formé une couche dense sous la croûte, surtout du côté de la face visible de la Lune.

Divers mécanismes ont été proposés pour expliquer cette distribution asymétrique (voir ci-contre). Cette couche riche en éléments radioactifs serait aussi liée à un volcanisme tardif (voir ci-dessous, à gauche). En outre, divers indices suggèrent que la Lune présentait un champ magnétique intense lors de sa formation (voir ci-dessous, à droite). Tous ces phénomènes appellent à une meilleure compréhension de la structure interne de la Lune.

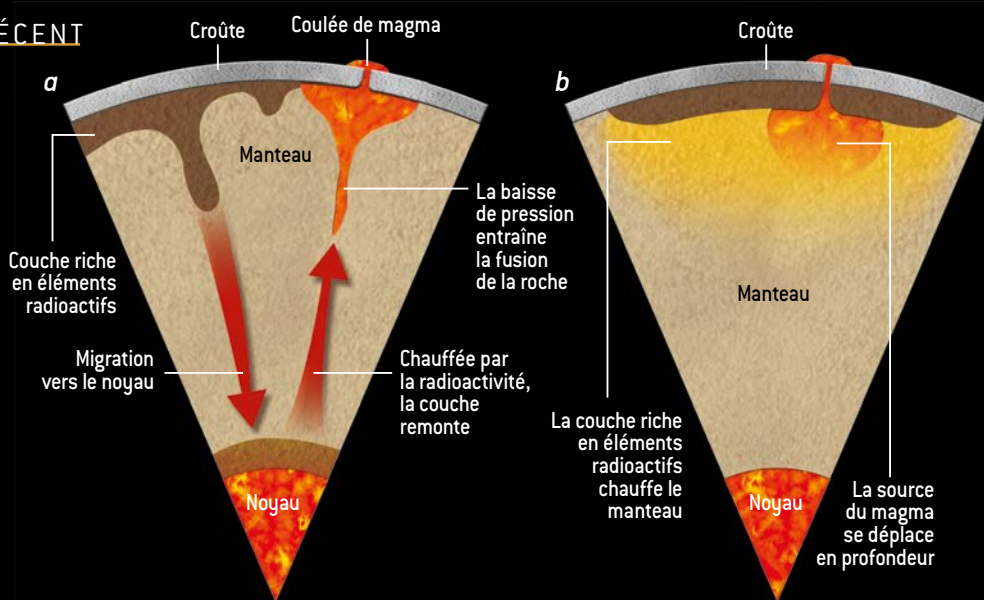
Tout au long de son histoire, la Lune a été soumise à un bombardement permanent de

météorites, avec certains événements notables comme la formation des bassins, de vastes dépressions dans la croûte. L'impact qui a donné naissance au bassin Pôle-Sud-Aitken (4) a aussi fait basculer l'axe de rotation de la Lune de 15 degrés (5). Le manteau sous les bassins a fondu et les a remplis de basalte, créant les mers lunaires sombres (6). La formation de la mer Procellarum a également provoqué un basculement de l'axe de rotation de 5 degrés. Enfin, les bombardements récents ont constellé la surface de cratères qui donnent à la Lune son aspect actuel (7).



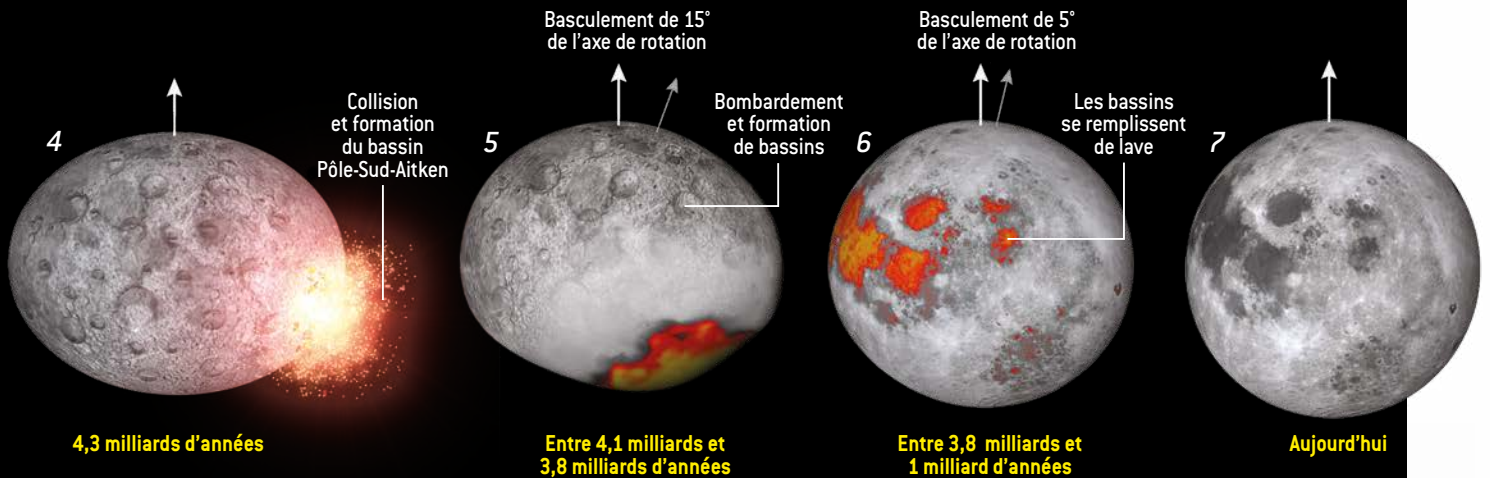
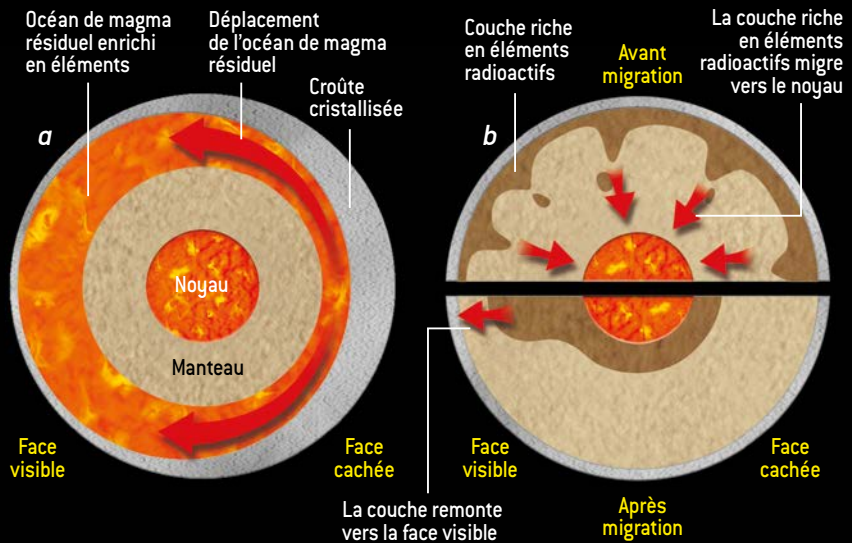
LE VOLCANISME LUNAIRE RÉCENT

LES observations de la surface de la Lune montrent des traces d'effusion magmatique de moins de 100 millions d'années. Pour expliquer une activité volcanique aussi tardive, plusieurs scénarios ont été proposés. Lors de la cristallisation de la croûte (en gris), une couche riche en éléments radioactifs (en marron) s'est formée sous la croûte. Cette couche, plus dense que le manteau (en beige) aurait pu ainsi s'enfoncer dans le manteau (a) jusqu'au noyau. En se réchauffant grâce aux éléments radioactifs, la couche s'est dilatée et est devenue moins dense. En remontant, elle a fondu du fait de la baisse de pression. Dans un autre scénario (b), la couche riche en éléments radioactifs a simplement chauffé la partie supérieure du manteau jusqu'à obtenir un magma, qui est remonté en surface.



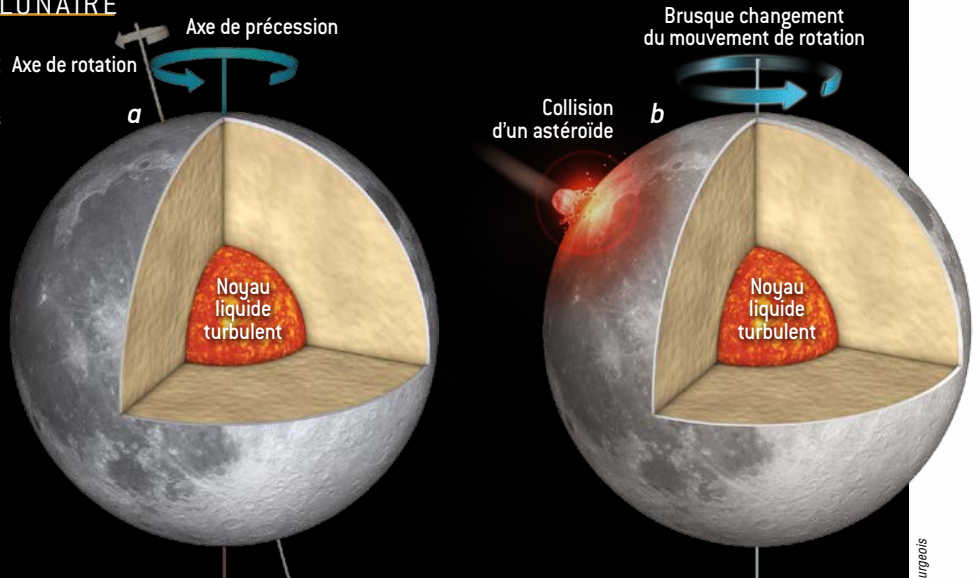
UNE CROÛTE ASYMÉTRIQUE

LA face visible et la face cachée présentent des compositions un peu différentes : certains éléments radioactifs sont plus abondants du côté de la face visible. Le processus de cristallisation pourrait expliquer cette asymétrie (a) : la face cachée aurait cristallisé plus vite, le magma résiduel aurait migré vers la face visible où il s'est enrichi en éléments radioactifs. L'asymétrie pourrait aussi être postérieure à la cristallisation (b). La couche riche en éléments radioactifs, plus dense que le manteau, se serait enfoncée jusqu'au noyau puis, selon certains modèles, serait remontée préférentiellement vers la surface de la face visible. Une autre possibilité est qu'une collision ait redistribué les éléments radioactifs de façon non uniforme.



LES MODÈLES DE DYNAMO LUNAIRE

UN CHAMP MAGNÉTIQUE GLOBAL NÉCESSITE la production de turbulences dans le noyau liquide du satellite. En plus des modèles liés au refroidissement du noyau, 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 – ait pu être assez intense, avec une forte inclinaison et une vitesse de rotation élevée, pour créer des turbulences (a). Une autre possibilité est fondée sur l'instabilité elliptique. En combinant la forme un peu elliptique de la Lune du fait de l'attraction terrestre et une variation dans la vitesse de rotation, due à la collision avec une météorite, des mouvements turbulents dans le noyau (b) peuvent se créer. Les données ne permettent pas de préciser les rôles respectifs de ces scénarios, qui pourraient être aussi complémentaires.



permettra de mieux comprendre la relation entre la proto-Terre, Théia et leur collision.

Ainsi, les observations semblent converger vers le scénario de la collision. Les planétologues savent expliquer la composition similaire de la Terre et de la Lune et le moment cinétique du système même si certains détails restent à clarifier. Cependant, l'étape suivante de l'histoire lunaire soulève ses propres questions.

En s'accrétant, les débris de la collision ont libéré de grandes quantités d'énergie, par conversion de l'énergie potentielle gravitationnelle en chaleur. Une partie du matériau lunaire a fondu en un océan de kilomètres de profondeur qui a recouvert toute la surface du satellite. En se refroidissant, le magma a rapidement cristallisé en une croûte, composée principalement d'anorthosite (une roche magmatique riche en feldspaths, dont sont constituées les zones les plus claires de la surface lunaire).

Le modèle le plus simple décrivant ce processus consiste à supposer que la cristallisation est homogène sur toute la surface du globe. Les propriétés de la croûte devraient alors être partout les mêmes. Il n'en est rien : les planétologues notent une grande disparité de ces propriétés, avec une

répartition asymétrique entre la face visible et la face cachée. Par exemple, les éléments dits incompatibles – qui ont tendance à rester dans la partie liquide du magma lors de la cristallisation et donc à s'accumuler sous la croûte – sont présents en plus grande concentration sur la face visible.

Une face cachée très différente

Les observations effectuées par la mission japonaise *Kaguya* (aussi nommée *Selene*) confirment cette tendance. Elles montrent en particulier que le rapport de concentration du magnésium et du fer est plus élevé sur la face cachée que sur la face visible. Le fer, étant un élément incompatible, aura eu tendance à être moins présent dans les premières roches à cristalliser de l'océan de magma. Cette observation suggère, par exemple, que la croûte de la face cachée a cristallisé plus tôt que la face visible. Le magma résiduel aurait alors migré vers l'hémisphère de la face visible (voir la figure page 31), où il se serait davantage enrichi en éléments radioactifs que sur la face cachée. Ce n'est pas la seule façon d'expliquer ce phénomène, mais il est certain que le modèle simple de formation de la croûte doit être révisé.

■ SUR LE WEB

La mission LRO, *Lunar Reconnaissance Orbiter*, de la Nasa, a effectué une cartographie précise de certaines régions de la surface lunaire. Les membres de l'équipe ont réalisé une vidéo qui résume l'histoire de la Lune : http://bit.ly/pls466_Lune1 et une visite guidée de la surface du satellite : http://bit.ly/pls466_Lune2

De l'eau sur la Lune

Longtemps jugée appauvrie en éléments volatils, la Lune semble en fait contenir une quantité non négligeable d'eau dans son manteau. Son étude permettrait de mieux comprendre comment l'eau est arrivée sur Terre.

En 2008, Alberto Saal, de l'université Brown, aux États-Unis, et ses collègues ont montré grâce à de nouvelles techniques d'analyse que de l'eau était présente dans des échantillons lunaires que l'on pensait déshydratés. Il est possible de relier ces observations à la quantité d'eau présente dans le manteau et dans le magma initial qui aurait contenu de l'eau à des concentrations de l'ordre de 100 parties par million.

Par ailleurs, l'eau est aussi présente à la surface du satellite. Des observations de la surface lunaire montrent que de la glace

est stable sur des temps géologiques dans les zones d'ombre permanente près des pôles. La stabilité de ces glaces a permis de préciser certains points de l'histoire lunaire, comme l'évolution de son orbite et le basculement de son axe de rotation.

La présence d'eau dans le manteau a une forte influence sur la dynamique des roches mantelliques et donc sur les scénarios qui décrivent les phénomènes de champ magnétique primordial et de volcanisme découverts récemment sur la Lune. En effet, l'eau réduit la viscosité des roches et

rend la convection, et donc le refroidissement, plus efficaces. En présence d'eau, il est ainsi difficile d'expliquer comment la Lune a maintenu une activité volcanique et magnétique pendant de longues périodes. L'étude de ces conséquences sur la Lune est encore récente et les modèles futurs devront intégrer cette nouvelle donnée.

L'importance de l'eau s'étend au scénario de formation de la Lune. Les modèles actuels montrent que la formation de la Lune par accrétion à partir d'un disque de débris créé par un impact géant aura tendance à produire une Lune appauvrie en éléments volatils, tel l'hydrogène dont l'eau est composée. Les observations récentes permettront donc de poser des contraintes plus fortes sur le

processus de formation, et donc potentiellement sur l'état initial de la Terre.

Ainsi, la question de l'origine de l'eau lunaire (présente dès la formation ou issue d'un apport externe après l'accrétion) est encore ouverte. Elle est cruciale, car elle permet aussi de comprendre l'origine de l'eau terrestre. En effet, cette eau est-elle le fruit d'un processus rare (où l'apport de la majorité de l'eau se serait fait lors de la collision de quelques corps riches en eau pendant la formation de la Terre), ou la présence d'eau est-elle très commune ? Et peut-on s'attendre à en voir fréquemment dans la composition d'exoplanètes, ces planètes en orbite autour d'autres étoiles et que l'on étudie de plus en plus ?

Une autre explication suppose que la cristallisation est symétrique, mais qu'une réorganisation de la structure interne de la Lune a enrichi la face visible en éléments incompatibles. Ceux-ci auraient d'abord formé, de façon globale, une couche dense entre la croûte et le manteau. Sous l'effet d'instabilités hydrodynamiques, cette couche aurait coulé dans le manteau en direction du noyau. Les éléments radioactifs qu'elle contenait l'auraient alors réchauffée, donc dilatée, sa densité aurait diminué et elle serait remontée vers la surface. Des simulations numériques montrent que la migration n'est pas forcément symétrique et que la couche d'éléments incompatibles remonte surtout vers la face visible. Nous verrons plus loin que ce mécanisme joue aussi un rôle dans le volcanisme tardif de la Lune.

L'asymétrie de la croûte pourrait aussi avoir une origine externe. Elle pourrait être le résultat, par exemple, d'un impact géant qui aurait changé la composition du manteau d'un hémisphère, mais pas de l'autre. Pour répondre à la question de l'origine de l'asymétrie, les planétologues attendent beaucoup d'une mission lunaire où un module se poserait sur la face cachée et en ramènerait des échantillons.

Basculements de l'axe

Après la formation de la croûte, il y a environ 4,3 milliards d'années, la Lune ne ressemblait pas encore à l'image que nous en avons aujourd'hui. En effet, depuis, notre satellite a été continuellement bombardé par des météorites qui ont constellé sa surface de cratères. Un événement remarquable est la collision avec une météorite qui a formé le bassin Pôle-Sud-Aitken (c'est le plus grand cratère d'impact connu du Système solaire). À la suite de cette collision, l'axe de rotation de la Lune aurait basculé de 15 degrés.

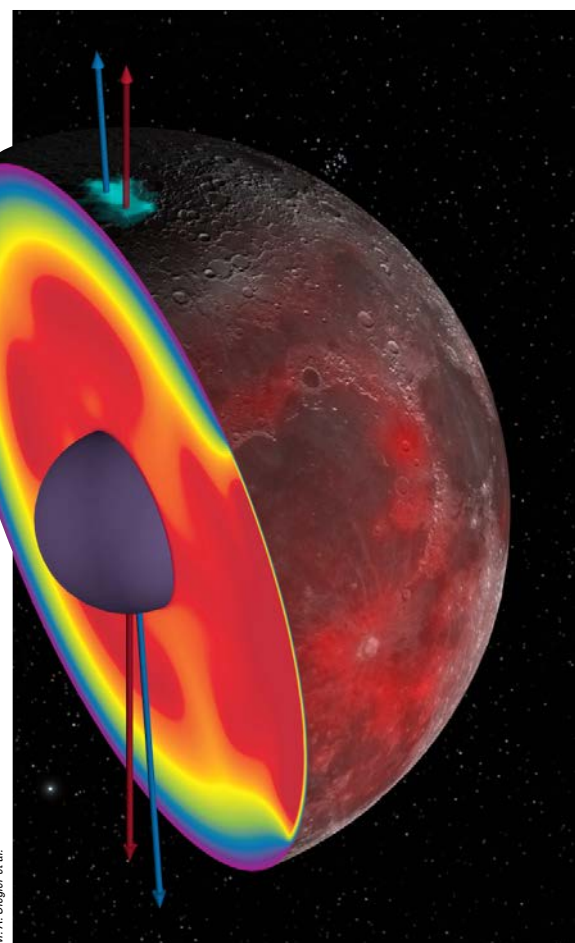
Ensuite, il y a entre 4,1 milliards et 3,9 milliards d'années, les planètes telluriques du Système solaire ont probablement connu une période de bombardement particulièrement intense. Cet épisode pourrait être dû à la perturbation d'un réservoir d'astéroïdes qui a envoyé les petits corps vers la partie interne du Système solaire. Selon les modèles récents de formation du Système solaire (« modèle de Nice » et « hypothèse du Grand Tack »), une modification de l'orbite des planètes Jupiter et Saturne serait à l'origine de ce « grand bombardement tardif ». La

Lune n'aurait pas échappé au phénomène et des météorites ont creusé de vastes bassins dans la croûte lunaire. Ces bassins se sont ensuite remplis de lave basaltique qui, en refroidissant, a formé une partie des zones sombres de la Lune, nommées aujourd'hui mers lunaires ou *maria*.

En 2016, avec plusieurs collègues, nous avons montré que l'axe de rotation de la Lune s'est aussi déplacé à cause de son évolution interne (voir la figure ci-contre). Nous avons constaté l'existence de deux régions riches en hydrogène, indicatif de la présence de glace d'eau, aux antipodes l'une de l'autre, mais à 5 degrés des pôles actuels. Ces régions ont donc probablement été les pôles il y a plusieurs milliards d'années. La réorganisation de la structure interne de la Lune à l'origine de la formation de la région Procellarum, une mer de basalte, et le changement associé de la répartition des masses aurait conduit au basculement de l'axe de rotation lunaire.

À ce stade de son histoire, la Lune ressemble au satellite que nous connaissons. Pourtant, si les planétologues commencent à avoir une bonne vision des grandes étapes géologiques de la Lune, ce satellite continue de nous surprendre, notamment avec la découverte qu'il était doté, dans le passé, d'un puissant champ magnétique. Ce n'est plus le cas aujourd'hui et seul un champ rémanent, figé dans certaines roches, subsiste. Il a été mesuré en 1998 par la sonde *Lunar Prospector* puis, plus récemment, par *Kaguya*. Mais ce champ résiduel est un indice en faveur d'un champ global actif par le passé. Cette idée est renforcée par l'analyse récente d'échantillons par des techniques de haute précision.

La présence ou non d'un champ magnétique important sur une planète ou un satellite nous renseigne sur son fonctionnement interne et, par conséquent, sur son histoire géologique. Les champs magnétiques planétaires résultent du mouvement d'un liquide conducteur, généralement du fer dans le noyau – induisant un « effet dynamo ». Ce mouvement peut être dû aux processus de refroidissement : de manière directe, il s'agit de convection dite thermique, ou indirecte, grâce à des forces de poussée liées à la cristallisation du noyau interne solide. Une autre possibilité est une activation mécanique du mouvement, due à un brusque changement de la direction de l'axe de rotation du manteau par rapport à



LA LUNE A BASCULÉ plusieurs fois au cours de son histoire. Lors de la formation de la mer de basalte Procellarum, l'axe de rotation a basculé de 5 degrés entre l'axe initial (en bleu) et l'axe actuel (en rouge).

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

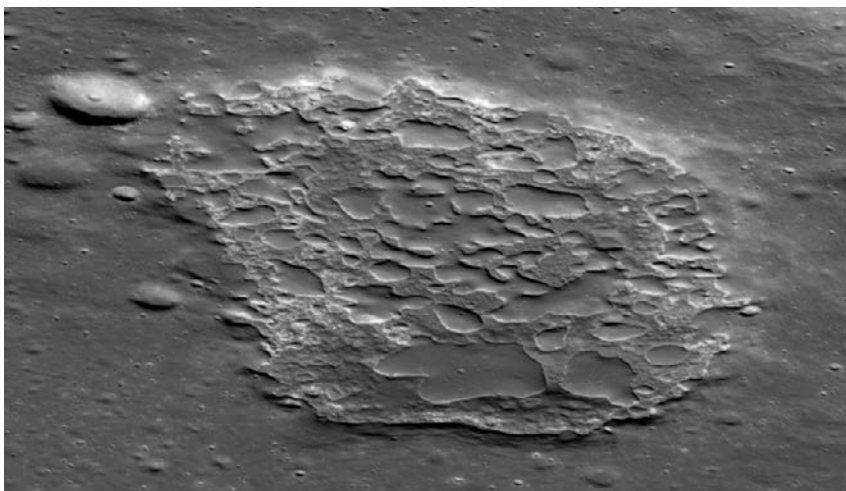
important que le champ magnétique terrestre aujourd'hui, bien que le noyau lunaire soit probablement dix fois plus petit que celui de la Terre relativement à sa taille.

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

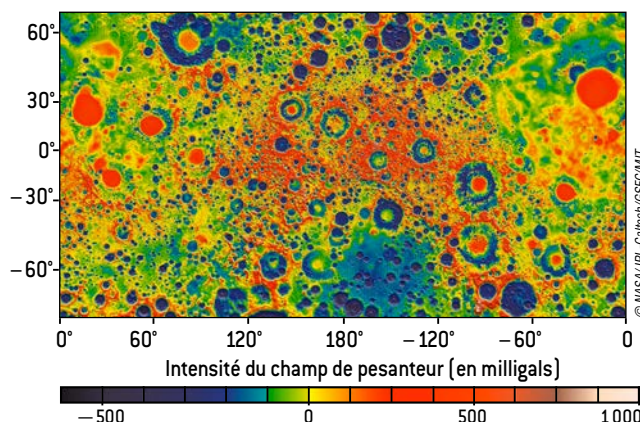


NASA/GSFC/université d'État de l'Arizona

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.

Gastornis

l'oiseau carnivore devenu végétarien

Delphine Angst, Eric Buffetaut, Christophe Lécuyer et Romain Amiot

***Gastornis* ? Un oiseau géant au bec puissant
qui dévorait les mammifères à l'aube du Tertiaire,
a-t-on longtemps pensé. Erreur : le colosse était herbivore.**



© Alan Bénédicte/paleospot.com

APPARU EN EUROPE il y a
quelque 60 millions d'années,
Gastornis, malgré sa taille
de 1,5 mètre et son bec
imposant, était probablement
un oiseau placide, à l'image
de cette reconstitution
du paléontographe
Alain Bénédicte.

