

L'intérieur de la Lune

RUTH ZIETHE

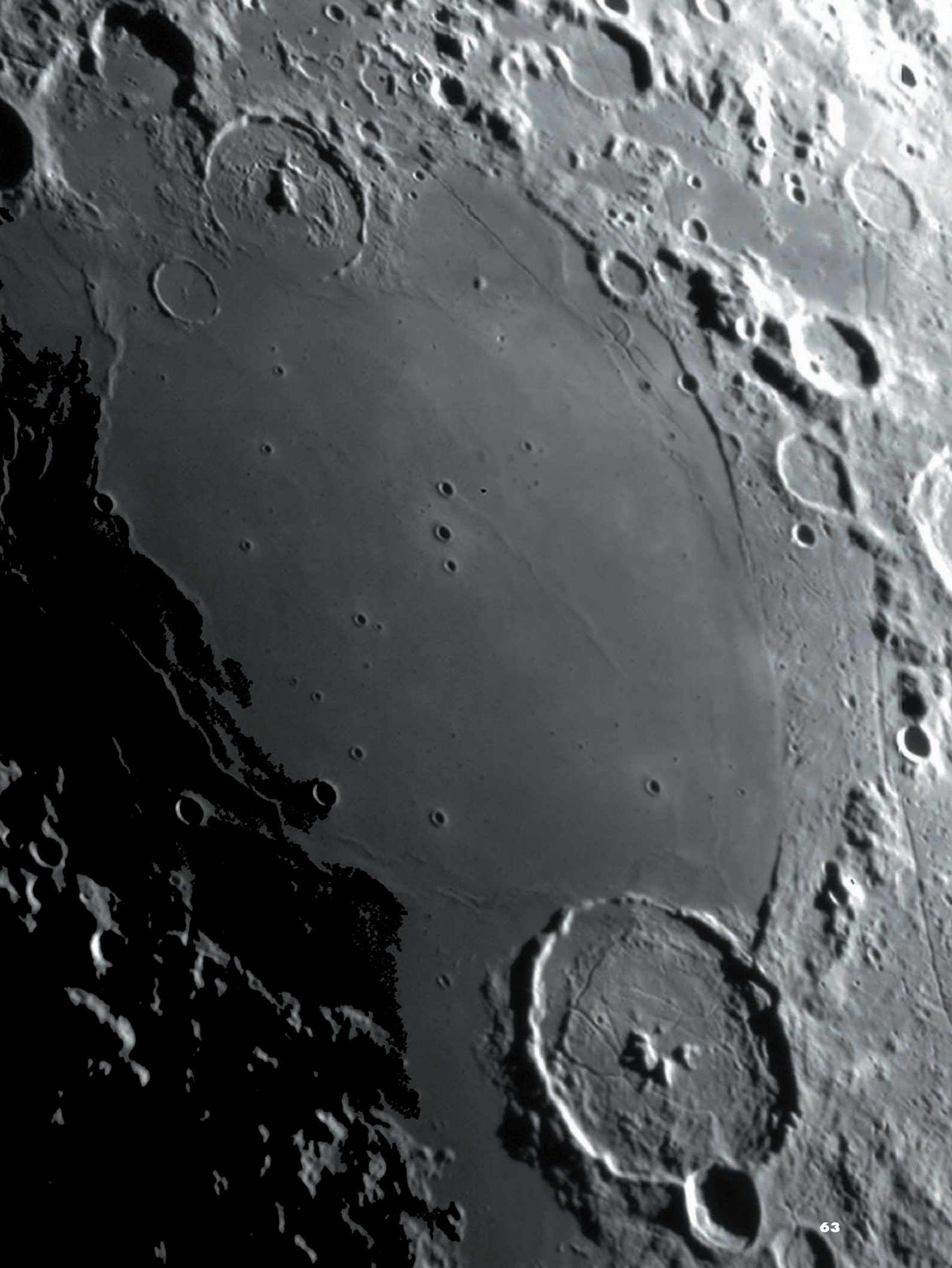
Les missions spatiales et des simulations numériques récentes nous renseignent sur l'histoire de la Lune et sur les conditions qui règnent dans ses couches les plus profondes.

Le «visage de la Lune» nous est familier depuis longtemps, mais il a fallu attendre le XX^e siècle pour que nous apprenions à l'interpréter correctement. À l'aide d'une simple paire de jumelles, l'observation révèle qu'il est constitué de deux types de terrains. Les zones sombres et lisses forment ce que les anciens astronomes nommaient des «mers». Les «continents» de la Lune sont, quant à eux, des terrains plus clairs dont la surface est criblée de cratères de toutes tailles. Depuis que l'exploration spatiale nous a fourni des images et des échantillons de la surface lunaire, nous pouvons nous faire une idée des conditions qui y règnent et remonter à l'origine de ce petit monde. Aujourd'hui, les scénarios que nous en tirons nous permettent de préciser les conditions physiques qui règnent à l'intérieur de notre satellite.

Sur la Lune, la transformation des sols est beaucoup plus lente que sur Terre. Notre planète est entourée d'une atmosphère complexe, dotée de zones climatiques différentes où croissent déserts et forêts tropicales. Les eaux, le vent, la pluie, la glace et la neige modèlent une surface où grouillent une multitude d'espèces animales et végétales. La croûte terrestre elle-même subit de lentes transformations : des montagnes s'élèvent, les terres sont submergées par les mers, et les continents dérivent lentement. Avec le temps, le visage de la Terre se modifie, car c'est une planète active. Sur la Lune, au contraire, il n'y a pas d'eau libre et l'atmosphère, que l'on nomme aussi exosphère, est extrêmement ténue : elle est si raréfiée que, si on la soumettait aux conditions de pression et de température qui règnent à la surface de la Terre,

1. LA SURFACE LUNAIRE n'a pas subi de transformations notables depuis près de deux milliards d'années. Ainsi, les missions spatiales qui l'ont explorée depuis le début des années 1960 nous ont rapporté une mine d'informations dont nous pouvons, aujourd'hui, tirer des scénarios expliquant sa formation.

NASA



elle tiendrait dans le volume d'une grande maison. La Lune a également connu une faible activité volcanique – comme l'attestent quelques dômes visibles de la Terre – qui n'a pas produit de modifications importantes (voir la figure 2). En conséquence, l'aspect de la surface lunaire n'a pas fondamentalement changé depuis des millions d'années.

Il fut pourtant un temps où le visage de la Lune était différent. À cette époque, une croûte superficielle solide venait de se former, qui ne pouvait résister à tous les impacts météoritiques auxquels l'astre était exposé. Au cours de la période qui s'est écoulée entre -4,4 et -3,8 milliards d'années, le Système solaire contenait une multitude de petits corps se déplaçant sur des orbites désordonnées, et il n'était pas rare qu'ils entrent violemment en collision avec la planète nouvellement formée. Au cours de cette phase de bombardement intense, la croûte de la Lune a été fracturée de multiples fois, et la matière fluide sous-jacente parvint à sa surface en de nombreuses occasions. Cette matière passait à l'état liquide lors de sa dépressurisation et s'épanchait dans les grands cratères d'impact produits par les collisions les plus violentes. Ainsi se sont formées les «mers» lunaires. Aux endroits où les météorites n'ont pas percé la croûte, elles ont pulvérisé la roche, façonnant un paysage cratérisé très varié et couvert de poussière. Nous connaissons cette couche de poussière, que les scientifiques nomment régo-lite, grâce aux prises de vues réalisées lors des missions *Apollo* : la célèbre photographie de la trace de pas montre l'extrême finesse des grains qui composent la matière superficielle (voir la figure 3). La compacité du régo-lite augmente avec la profondeur. Au total, l'épaisseur de cette couche atteint quelques kilomètres. Après le déclin du bombardement météoritique, la surface lunaire n'a pas notablement changé. Ainsi la roche lunaire la plus jeune a plus de deux milliards d'années.



2. LES COLLINES DE MARIUS sont une des rares formations volcaniques de la Lune. Outre les nombreux cratères d'impacts omniprésents, on observe quelques dômes de volcans (à l'extrême droite de l'image) ainsi que les lits d'anciens fleuves de lave.

Les missions spatiales

La Lune a fait l'objet de nombreuses missions spatiales scientifiques, telles les missions *Luna* et *Apollo*, qui ont été déterminantes pour le progrès de nos connaissances. Les satellites artificiels en orbite autour de la Lune nous renseignent sur sa structure globale. Ainsi, nous avons établi que son rayon moyen est égal à 1 738 kilomètres et que sa masse est de $7,349 \times 10^{22}$ kilogrammes. Par conséquent, sa densité moyenne est égale à 3,34 grammes par centimètre cube. Ces données constituent un premier indice pour les planétologues qui cherchent à déterminer la structure interne de la Lune. En effet, les roches des planètes telluriques, c'est-à-dire Mercure, Vénus, la Terre, la Lune et Mars, ainsi que les satellites galiléens de Jupiter, Io et Europe, sont comprimées sous l'action de la gravité. Pour quantifier cet effet, les astronomes calculent la densité qu'auraient les roches constitutives de ces astres si elles étaient soumises à des conditions standards de température et de pression (25 °C et 10^5 pascals). Cette densité standard théorique est généralement inférieure à la densité moyenne mesurée, ce qui indique que ces planètes sont comprimées par leur propre poids. Or, la Lune constitue une exception dans ce domaine : sa densité standard (3,38 grammes par centimètre cube) est supérieure à sa densité moyenne. On en déduit qu'il règne, à l'intérieur de la Lune, une température suffisante pour dilater la matière. De tels mécanismes existent également au cœur des autres planètes telluriques, mais, dans leur cas, l'effet de la compression dû à la gravité domine la dilatation thermique. La matière lunaire n'est que faiblement comprimée en raison de la petite taille de l'astre, et l'effet de la dilatation thermique compense celui de la pesanteur (voir la figure 4).

Par ailleurs, grâce aux mesures du champ de gravité lunaire, on a établi le moment d'inertie de la Lune. Le moment d'inertie d'un corps exprime sa résistance aux forces qui tendent à modifier son mouvement de rotation, c'est-à-dire le fait que ce corps se comporte plus ou moins comme un gyroscope. Le moment d'inertie d'un objet comme la Lune est égal à sa masse multipliée par le carré de son rayon et par un coefficient qui caractérise la répartition de la matière autour de l'axe de rotation. Dans le cas d'une sphère homogène tournant autour d'un axe passant par son centre, ce «facteur de forme» vaut 0,4. Plus la masse est concentrée près de l'axe de rotation, plus le facteur de forme est petit. Dans le cas de la Lune, on a établi qu'il vaut 0,3931. Il est très peu différent du coefficient d'une sphère homogène, ce qui signifie que la densité de la Lune augmente peu avec la profondeur. À titre de comparaison, le facteur de forme du moment d'inertie terrestre vaut 0,3307, en raison du noyau de fer massif présent dans les entrailles de notre planète. On pense que la Lune a peut-être, elle aussi, un petit noyau riche en fer, mais que son rayon ne dépasse pas le quart du rayon lunaire (contrairement au noyau terrestre dont le rayon est égal à 55 pour cent du rayon terrestre).

Lorsque des engins spatiaux sont parvenus à se poser sur la surface de la Lune, on a commencé à mesurer son activité sismique. En étudiant les temps d'arrivée des ondes sismiques aux différents sismographes installés sur la surface lunaire, on reconstruit le trajet de ces ondes à l'intérieur de la Lune et on en déduit la variation de leur vitesse en fonction de la profondeur. Comme cette vitesse dépend de la déformabilité et de la compressibilité des roches traversées, ces données permettent de sonder les couches profondes

de la Lune et ont contribué à l'établissement de sa structure interne (voir la figure 6). Par ailleurs, le retour sur Terre d'échantillons rocheux a radicalement modifié nos hypothèses quant à l'origine de notre satellite naturel. En effet, les planétologues ont découvert, à cette occasion, que la composition des roches lunaires est presque identique à celle des roches du manteau terrestre.

La formation de la Lune





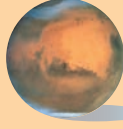
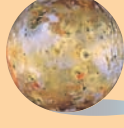
Jusqu'à-là, nous disposions de trois hypothèses classiques pour expliquer la formation de la Lune : celle de la capture, celle de l'accrétion double et celle de la fission (voir la figure 5). Selon la première hypothèse, une petite planète, formée dans une autre région du Système solaire, aurait dérivé jusqu'au voisinage de la Terre qui l'aurait capturée dans sa sphère d'influence. Cette hypothèse a été réfutée pour deux raisons. Tout d'abord, il est très improbable que la Terre puisse capturer un astre aussi massif que la Lune voyageant à travers l'espace à une vitesse de l'ordre de grandeur de celles des astres du Système solaire (quelques dizaines de milliers de kilomètres par heure). De plus, l'hypothèse de la capture ne permet pas d'expliquer la ressemblance entre les roches terrestres et les roches lunaires. En revanche, cette ressemblance est correctement expliquée par la théorie de l'accrétion double. Dans ce cadre, on imagine que les poussières présentes dans notre région du Système solaire se seraient agglomérées en une planète double : le système Terre-Lune. Cependant, on calcule que le moment cinétique total de ce système serait beaucoup plus élevé qu'il ne l'est aujourd'hui. De plus, la similitude chimique entre la Terre et la Lune devrait être presque parfaite, ce qui est exclu par les mesures de gravimétrie qui ont montré – nous l'avons rappelé – que la Lune est dépourvue de l'important noyau de fer caractéristique de la Terre.

L'hypothèse de la fission pourrait expliquer que seules les roches du manteau terrestre s'apparentent à celles de la Lune. Dès 1878, George Darwin (le fils du naturaliste) postula qu'au début de l'histoire de la Terre, un morceau de sa surface aurait été éjecté et que l'océan Pacifique constituerait la cicatrice laissée par cet événement. La thèse avancée par Darwin fut complétée par l'idée que la rotation de la Terre, beaucoup plus rapide par le passé, produisait un renflement équatorial tel qu'une partie de la matière avait pu être expulsée dans l'espace. Cependant, lorsque nous mesurons le moment cinétique total du système Terre-Lune, nous constatons qu'il est trop petit pour qu'une rotation aussi rapide ait été possible par le passé, à moins que le moment cinétique ait diminué depuis, en raison d'un phénomène encore inconnu.

Depuis le retour des échantillons lunaires, les astronomes se tournent vers une quatrième théorie. On pense que, vers la fin de la formation de la Terre, il y a 4,5 milliards d'années, une petite planète de la taille de Mars (dix fois moins massive que la Terre) a percuté notre monde. L'impact fut si violent que le planétoïde et les roches du manteau supérieur terrestre furent vaporisés. Puisque la Terre s'était déjà notablement différenciée, l'essentiel du fer qu'elle contenait était concentré dans son noyau et ne fut pas éjecté dans l'espace. Une grande partie de la matière expulsée retomba sur Terre pour y reconstituer un manteau dont la composition chimique était très semblable à celle des roches qui restèrent satellisées. Ces roches formèrent par la suite un satellite géant, la Lune. Cette hypothèse



3. LE RÉGOLITE qui recouvre les « continents » lunaires est une couche de poussières de quelques kilomètres d'épaisseur. Ses grains très fins ont été produits par les innombrables impacts météoritiques qui ont frappé notre satellite depuis sa formation et, surtout, au cours des 600 premiers millions d'années de son histoire.

PLANÈTE	DENSITÉ MOYENNE (en grammes par centimètre cube)	DENSITÉ AUX CONDITIONS STANDARDS
MERCURE 	5,43	5,30
VÉNUS 	5,25	4,00
TERRE 	5,60	4,10
LUNE 	3,34	3,38
MARS 	3,94	3,8
IO 	3,55	3,60

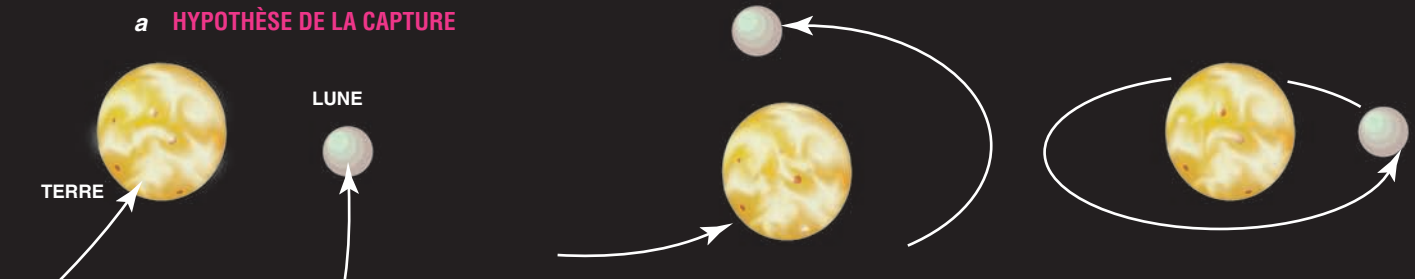
4. LA DENSITÉ MOYENNE des planètes est souvent plus élevée que la densité théorique standard que les planétologues calculent en supposant que leurs roches sont soumises à une température de 25°C et à une pression de 10⁵ pascals. Ceci traduit le fait que les roches de ces planètes sont comprimées sous l'effet de la pesanteur. La Lune fait exception, car sa température interne dilate les roches lunaires.

explique la similitude entre les roches superficielles des deux astres ; elle explique également l'absence de fer sur la Lune ainsi que sa faible teneur en éléments volatils.

Dans le cadre de la théorie de l'impact, on peut établir assez précisément les conditions qui régnaient à l'intérieur de la Lune à l'époque de sa formation. L'accrétion des particules rocheuses condensées dans le nuage de matière satellisée a dû dégager une grande quantité de chaleur : les grains s'entrechoquaient violemment pour former des blocs de plus en plus gros qui tombaient les uns sur les autres. À mesure que la Lune grossissait, les blocs rocheux atteignaient sa surface avec des vitesses de plus en plus grandes, et leur énergie cinétique, transformée en chaleur, faisait fondre ses

couches superficielles. La Lune naquit couverte d'un vaste océan de magma qui atteignit une profondeur de 400 kilomètres. Ce magma ne tarda pas à se solidifier, car il rayonnait son énergie thermique dans l'espace et en transférait une partie vers les profondeurs plus froides de la Lune. Dans les régions en fusion, les éléments lourds se séparaient des éléments légers et, petit à petit, commençaient à migrer vers le centre. Ce mécanisme de différenciation chimique s'accompagnait d'une importante libération d'énergie qui échauffait les couches plus profondes de la Lune. Ainsi, la différenciation s'auto-entretenait et se propageait vers le centre de l'astre. Aujourd'hui, nous pensons que la jeune Lune se dota rapidement d'un petit noyau chaud presque entièrement

a HYPOTHÈSE DE LA CAPTURE



La Lune, formée dans une autre région du Système solaire, aurait dérivé vers la Terre. Sa trajectoire aurait été fortement incurvée au voisinage de notre planète autour de laquelle elle se serait mise en orbite.

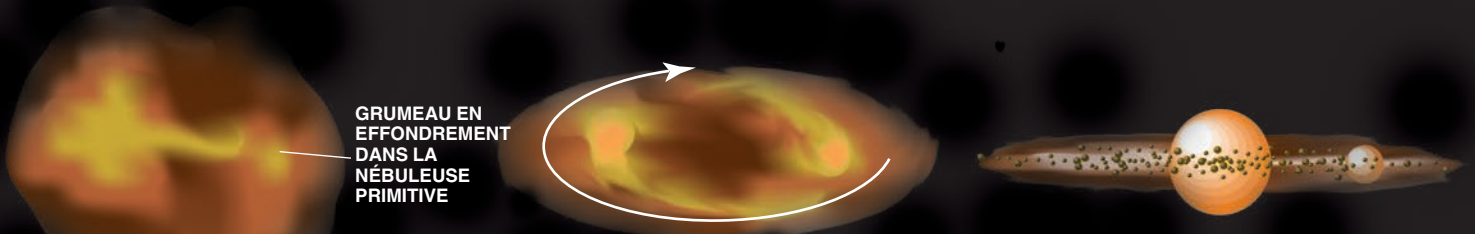
b HYPOTHÈSE DE LA FISSION



La vitesse de rotation de la Terre aurait été très grande par le passé, engendrant un renflement équatorial important.

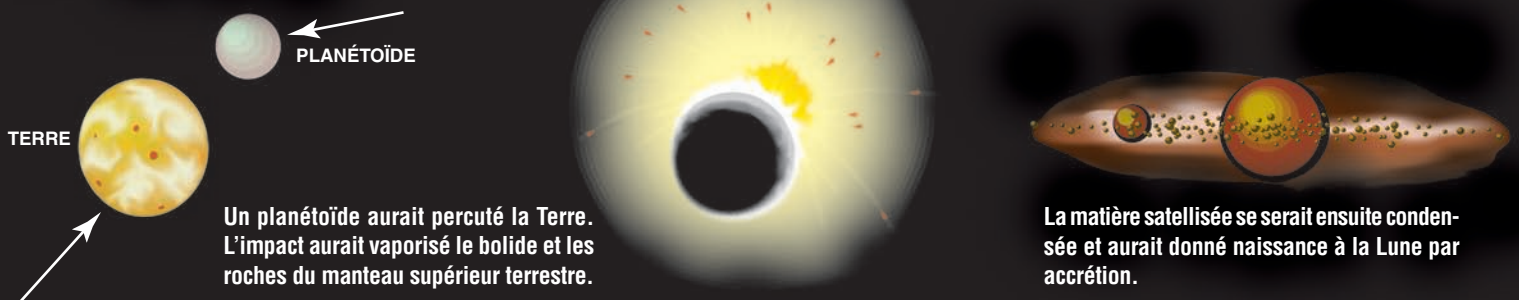
À partir de ce renflement, une partie des roches terrestres auraient été éjectées dans l'espace.

c HYPOTHÈSE DE L'ACCRÉTION DOUBLE



La fraction de la nébuleuse primitive qui s'est condensée pour donner naissance à la Terre serait effondrée en deux morceaux, formant ainsi une planète double : le système Terre-Lune.

d HYPOTHÈSE DE L'IMPACT



Un planétoïde aurait percuté la Terre. L'impact aurait vaporisé le bolide et les roches du manteau supérieur terrestre.

La matière satellisée se serait ensuite condensée et aurait donné naissance à la Lune par accrétion.

5. LA FORMATION DE LA LUNE a fait l'objet de différentes théories : la capture (a), la fission, (b), l'accrétion double (c). Selon la théorie de l'impact (d) aujourd'hui admise, un planétoïde a percuté la Terre vers

la fin de sa formation. Une partie de la matière éjectée par l'impact est retombée sur Terre pour former un nouveau manteau, tandis que le nuage de débris resté en orbite s'est rapidement condensé pour former la Lune.

composé de fer, dont la température était notablement supérieure à celle du manteau, ainsi que d'une enveloppe rigide – la lithosphère – qui se forma rapidement. La température de cette enveloppe décroissait rapidement de l'interface avec le manteau jusqu'à la surface. Dès lors, la Lune, organisée en couches de températures différentes, devint sans doute le siège de mouvements de convection.

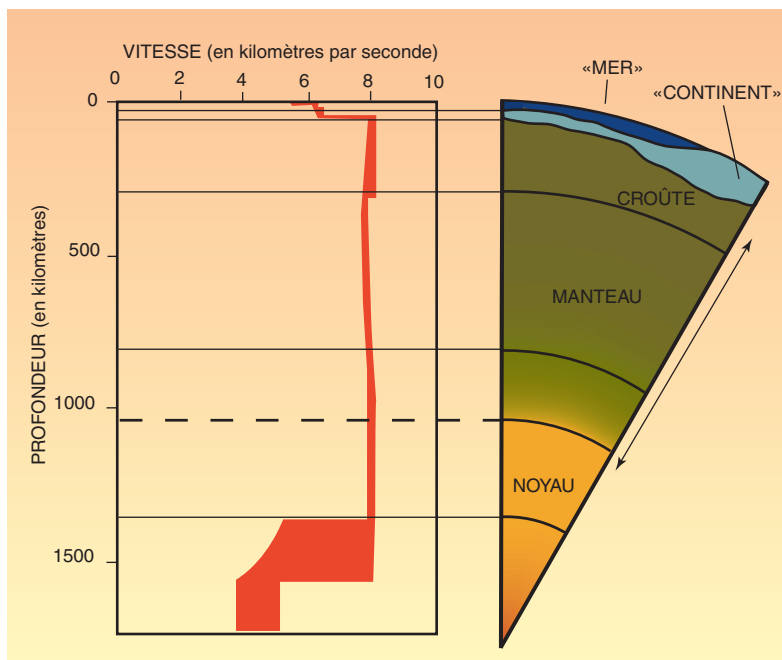
Le verdict des ordinateurs

Pour calculer l'évolution thermique de la Lune, on exploite certaines lois bien connues de la physique : la conservation de la masse, de l'énergie et de la quantité de mouvement. Une roche solide soumise à des températures et à des pressions élevées se comporte, si on considère une durée suffisamment longue (plus de 100 000 ans), comme un fluide très visqueux. Ce fluide est animé de mouvements dont le moteur n'est autre que la poussée d'Archimède. Les roches du manteau en contact avec le noyau de la Lune sont dilatées sous l'effet de sa température élevée. Elles acquièrent une densité inférieure à celle des roches situées immédiatement au-dessus d'elles. Ces roches chauffées s'élèvent dans le manteau tandis que les plus froides tendent à y sombrer. Ce mécanisme de convection fait circuler la matière du manteau en quelques centaines de millions d'années. L'énergie nécessaire à ce mouvement de convection est fournie par le noyau lunaire et par la désintégration d'isotopes radioactifs dans le manteau qui libère aussi de la chaleur. Comme le noyau chauffe la roche à la façon d'une plaque de cuisson, et que les éléments radioactifs fournissent de la chaleur comme le fait un four à micro-ondes, c'est-à-dire dans tout le volume de l'astre, on qualifie ces deux sources d'énergie de chauffage par dessous et de chauffage en volume.

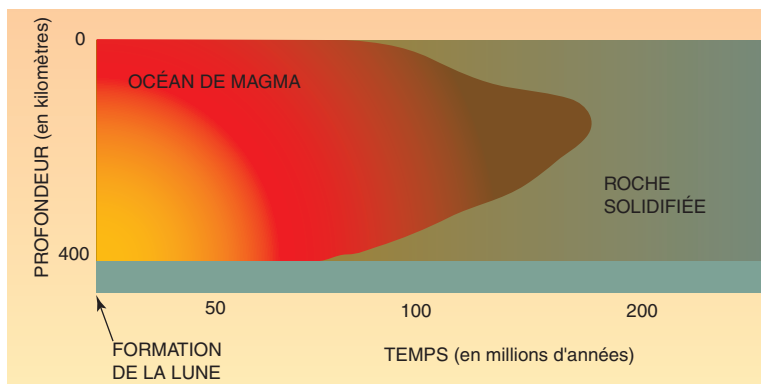
À l'Institut de planétologie de l'Université de Münster, nous avons simulé, à l'aide de programmes informatiques, ces courants de convection qui brassent la matière lunaire. Pour ce faire, nous avons subdivisé la Lune en plus de 700 000 éléments de volume auxquels nous avons appliqué les principes que nous venons de décrire. Ainsi, nous avons pu interroger notre programme pour connaître la pression, la température, mais aussi la viscosité des roches du manteau à n'importe quelle profondeur et à n'importe quel moment de l'histoire lunaire.

Il y a environ 4,5 milliards d'années, la température du noyau de la Lune était encore très élevée (environ 2 000 °C). De puissants panaches de matière chaude montaient de l'interface du noyau et du manteau jusqu'à la limite inférieure de la lithosphère. Cette lithosphère s'est formée très tôt. En effet, la perte d'énergie par rayonnement est proportionnelle au rapport de la surface sur le volume, rapport qui, en raison de la petite taille de la Lune, est beaucoup plus grand pour notre satellite que pour la Terre. Ainsi, les couches externes de la Lune se sont refroidies rapidement, et une lithosphère dont l'épaisseur pouvait atteindre 400 kilomètres s'est formée en moins de deux milliards d'années. Cette lithosphère était trop rigide pour être animée de mouvements de convection, et la chaleur n'y progressait que par conduction, un mécanisme beaucoup moins efficace que la convection. Ainsi, la couche rigide à la surface de la Lune a joué le rôle d'un isolant thermique vis-à-vis du manteau sous-jacent. Ce scénario prédit que le manteau de la Lune s'est refroidi beaucoup plus lentement que si elle avait été dotée d'une lithosphère plus mince.

La température du noyau diminua jusqu'à ce que, au bout d'à peine 300 millions d'années, elle atteigne celle du manteau. Dès lors, les mouvements convectifs ne furent plus entretenus que par la désintégration des éléments radioactifs contenus dans les roches lunaires. Les panaches chauds bien localisés qui caractérisaient l'ère précédente ont progressivement disparu, et le mouvement ascendant de la matière chaude devint plus diffus. Des panaches froids s'enfonçant tels d'immenses doigts dans la matière chaude ont commencé à sombrer dans le manteau à partir de la limite inférieure de la lithosphère. Au bout d'un certain temps, la structure de convection du manteau ne fut plus déterminée par de grands courants ascendants, mais par l'existence de petites anomalies de température dans le volume du manteau. On pense qu'aujourd'hui les mouvements convectifs ont pratiquement



6. L'ÉVOLUTION DE LA VITESSE des ondes sismiques avec la profondeur nous renseigne sur la structure en couches de la Lune. On n'a représenté ici que les ondes P, des ondes de compression semblables aux ondes sonores dont la célérité augmente avec la rigidité des roches traversées. Les brusques variations que l'on observe indiquent l'existence de couches de nature minéralogique distincte.



7. ÉVOLUTION DE L'OCÉAN DE MAGMA en fonction du temps (*en abscisse*) et de la profondeur (*en ordonnée*). Cet océan, qui atteignait initialement une profondeur de 400 kilomètres, s'est complètement figé au bout de 200 millions d'années. À ce moment, la température sous la lithosphère dépassait encore le point de fusion des roches silicatées. Les roches qui atteignaient la surface passaient à l'état liquide lors de leur dépressurisation et alimentaient l'activité volcanique lunaire.

disparu. Pourtant, nos calculs indiquent que, dans le manteau inférieur, subsistent des régions où la température dépasse celle de la roche avoisinante et où des déplacements de matière doivent se produire. Toutefois, ces déplacements seraient de l'ordre de un demi-millimètre par an (les continents terrestres dérivent de quelques centimètres par an).

Nous avons calculé la température de la Lune tout au long de son histoire et montré qu'elle a parfois dépassé le point de fusion des roches silicatées. Nos simulations suggèrent qu'au début de l'histoire lunaire, il existait une région où la température dépassait ce point de fusion et qui formait une enveloppe presque fermée à l'intérieur de l'astre,

juste au-dessous de la lithosphère. C'est ce réservoir qui serait à l'origine des laves qui, en s'épanchant dans les grands cratères d'impact, formèrent les sols basaltiques des mers lunaires. À mesure que la Lune refroidissait, cette couche s'est amincie. Elle se rétracta ensuite là où les doigts froids tombant de la limite inférieure de la lithosphère la traversaient. Après environ deux milliards d'années, la température du manteau lunaire était partout inférieure au point de fusion des roches silicatées. Ainsi, selon nos calculs, l'activité volcanique de la Lune s'est arrêtée 2,5 à 3 milliards d'années après le début de son histoire.

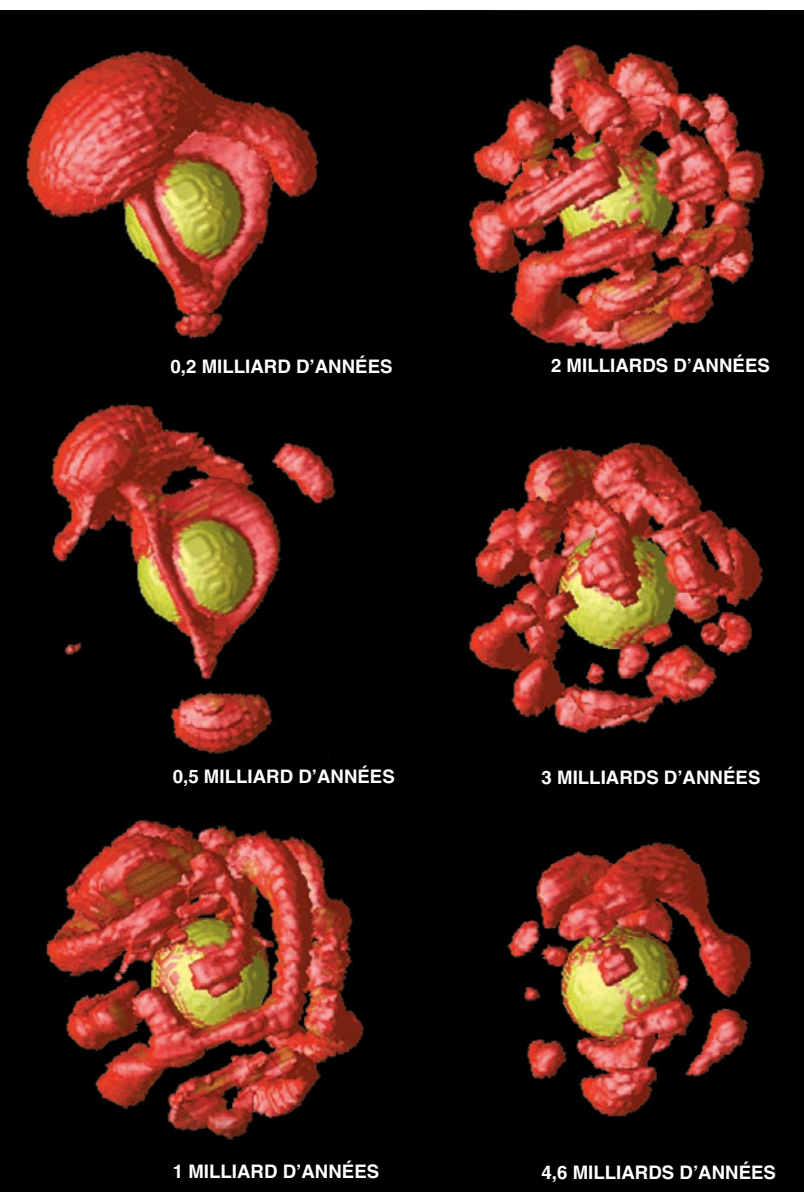
Tremblements de Lune

Bien sûr, ces simulations numériques sont fondées, en partie, sur des hypothèses et elles ne sauraient remplacer la recherche de preuves *in situ*. Il est important de comparer les résultats obtenus avec les mesures effectuées lors des missions d'exploration spatiale : c'est la seule façon de vérifier si les hypothèses émises sont correctes et d'apporter des améliorations à nos modèles.

Selon les mesures de l'activité sismique de la Lune effectuées dans le cadre des missions *Apollo*, les hypocentres des séismes lunaires sont tous situés entre 600 et 900 kilomètres de profondeur, près de la limite entre la lithosphère et le manteau. On pense qu'ils sont provoqués, le plus souvent, par la contraction des roches lors de leur refroidissement. Cette contraction engendre des contraintes dans le matériau solide qui sont libérées sous forme d'ondes sismiques. Dans ce cadre, les foyers des séismes ne peuvent se trouver que là où la matière est rigide et n'est plus animée de mouvements de convection. Nos modèles, qui prédisent que la lithosphère atteint une profondeur de 400 kilomètres et que le manteau supérieur, immédiatement au-dessous, est lui aussi devenu rigide, sont compatibles avec ces mesures. De plus, ces mesures sont compatibles avec une autre prédiction de notre modèle : l'existence dans le manteau inférieur de régions encore assez chaudes pour connaître des mouvements convectifs très lents.

Les données orbitales des sondes spatiales nous ont appris que le centre de masse de la Lune se trouve à environ deux kilomètres de son centre géométrique. Il est possible que ce résultat soit une confirmation de l'existence de rouleaux de convection dans le manteau, au début de l'histoire lunaire (ces rouleaux, figés par le refroidissement de l'astre, constitueraient des anomalies de densité dans le manteau). Ainsi, dans les modèles de Lune auxquels aboutissent nos simulations, le centre de masse est, en moyenne, éloigné de trois kilomètres du centre géométrique, ce qui est remarquablement proche des observations. Toutefois, il n'est pas inconcevable que ce décalage soit produit par une variation de l'épaisseur de la croûte lunaire dans certaines régions, et de nouvelles observations seront nécessaires pour déterminer le rôle respectif de ces deux phénomènes.

D'autres difficultés subsistent. Selon certaines datations radioactives, la Lune connaissait encore une activité magmatique il y a environ un milliard d'années. Or, pour le moment, aucun de nos modèles ne prévoit que les températures étaient encore supérieures au point de fusion des roches silicatées à cette date (tous nos modèles prédisent que la température des roches du manteau passe sous ce point 500 millions d'années plus tôt). Toutefois, nous avons bon espoir d'obtenir des résultats complémentaires dans ce domaine.



8. L'ÉVOLUTION DE LA STRUCTURE DE CONVECTION du manteau lunaire est étudiée à l'aide de simulations numériques. Certaines régions, plus chaudes que la matière environnante, subissent une poussée d'Archimède (les zones en rouge ont une température supérieure de 40 kelvins aux régions voisines). Au cours du premier demi-milliard d'années, la structure de convection était dominée par l'existence de grands panaches de matière chaude montant de l'interface du noyau (en jaune) et du manteau. Par la suite, le noyau s'étant refroidi, les anomalies locales de température furent la cause des mouvements de convection. Aujourd'hui encore, après 4,6 milliards d'années, il subsiste peut-être des régions où la matière est animée de mouvements de convection dans le manteau inférieur de la Lune.



0,5 MILLIARD D'ANNÉES



1 MILLIARD D'ANNÉES



1,5 MILLIARD D'ANNÉES

9. LA TEMPÉRATURE DU MANTEAU SUPÉRIEUR dépassa le point de fusion des roches silicatées (*en rouge, les roches dépassant ce point de 15 kelvins*) pendant plus de un milliard d'années. Cette couche de matière située juste au-dessous de la lithosphère constituait le réservoir à partir duquel se formèrent les mers lunaires et qui

alimenta la faible activité volcanique subséquente. Par la suite, cette couche initialement presque fermée s'est refroidie et s'est rétrécie aux endroits où les roches froides à la base de la lithosphère ont sombré dans le manteau. On pense qu'elle avait presque entièrement disparu au bout de deux milliards d'années.

L'époque jusqu'à laquelle les températures de certaines régions se sont maintenues au-dessus du point de fusion est liée aux températures qui régnaient au sein de la Lune au début de son histoire. Nous avons la quasi-certitude qu'au début de son évolution, la Lune abritait une zone où la température dépassait ce point de fusion, et dont la forme et la position avaient été imposées par l'existence d'un océan de magma cristallisé. Or, les avis divergent quant à l'épaisseur initiale de cet océan. Si l'on admet qu'il était relativement épais (environ 600 kilomètres), alors le manteau supérieur de la Lune a dû être, en moyenne, plus chaud et s'est refroidi plus lentement que les modèles précédents ne le prévoyaient. En outre, le manteau lunaire contient peut-être des impuretés, dont on montre, en thermodynamique, qu'elles ont généralement pour effet d'abaisser le point de fusion.

Nouvelles missions

Nous sommes désormais presque certains que l'intérieur de la Lune était, au cours de son évolution, en partie fondu. Cependant, les opinions divergent encore quant à l'évolution de cette roche partiellement fluide. Nous pensons que la couche magmatique qui se trouvait sous la surface lunaire contenait probablement des composés de densité et de point de fusion différents. Ces composés ont cristallisé en premier, se sont refroidis et ont migré vers les régions plus profondes. Ainsi, pendant une longue période, l'océan de magma était constitué d'un mélange de composants solides et de composants fluides. La simulation numérique d'un tel scénario n'est pas facile à réaliser. On considère un système où la matière fluide circule entre des «blocs de roche» déjà solides, et les déplacements de matière deviennent assez différents des simples mouvements de convection que nous avons évoqués. À l'Institut de planétologie de Münster, nous allons tenter de modéliser non seulement l'évolution thermique, mais aussi l'évolution chimique de la Lune.

La Lune, notre voisine la plus proche dans le Système solaire, excite toujours notre curiosité. Astronomes et ingénieurs espèrent que, dans un futur assez proche, des

robots et des hommes se promèneront à nouveau à la surface de notre satellite. Si une base permanente y était établie, il serait possible d'explorer la Lune de manière plus approfondie au moyen de méthodes variées. Cependant, de tels projets n'existent qu'à l'état embryonnaire. Heureusement, nous n'aurons pas besoin d'attendre leur réalisation pour disposer de nouvelles données grâce auxquelles nous améliorerons nos modèles et nous préciserons l'histoire de notre satellite.

De nouvelles missions scientifiques sur la Lune pourraient constituer une base de données plus vaste et plus exacte, qui réduirait davantage les incertitudes subsistant dans nos études. Au début de l'année 2003, l'Agence spatiale européenne lancera vers la Lune la sonde SMART-1 afin de tester de nouvelles techniques de propulsion utiles pour les futures missions interplanétaires. Cet engin effectuera aussi des mesures destinées à déterminer la composition et les caractéristiques minéralogiques du sol lunaire. La sonde japonaise *Lunar-A* lancera, quant à elle, deux «pénétrateurs» qui iront se ficher dans le sol lunaire et y mesureront l'activité sismique, ainsi que certaines des caractéristiques de la matière superficielle. Avec cette nouvelle moisson de données, on est en droit d'espérer que nous comprendrons mieux les mécanismes à l'œuvre dans les couches internes de la Lune ainsi que leur structure... et que des résultats inattendus surgiront.

Ruth ZIETHE mène ses recherches à l'Institut de planétologie de l'Université de Münster, en Allemagne.

J. TAYLOR, *L'héritage scientifique des missions vers la Lune*, in *Pour la Science*, n° 203, septembre 1994.

T. SPOHN, W. KONRAD, D. BREUER et R. ZIETHE, *The Longevity of Lunar Volcanism : Implications of Thermal Evolution Calculations with 2-D and 3-D mantle convection models*, in *Icarus*, vol. 149, pp. 54-65, 2001.

La naissance de la Lune, in *Pour la Science*, n° 288, octobre 2001.

Michael LIGHT, *Pleine Lune*, Éditions de La Martinière, 2002.
