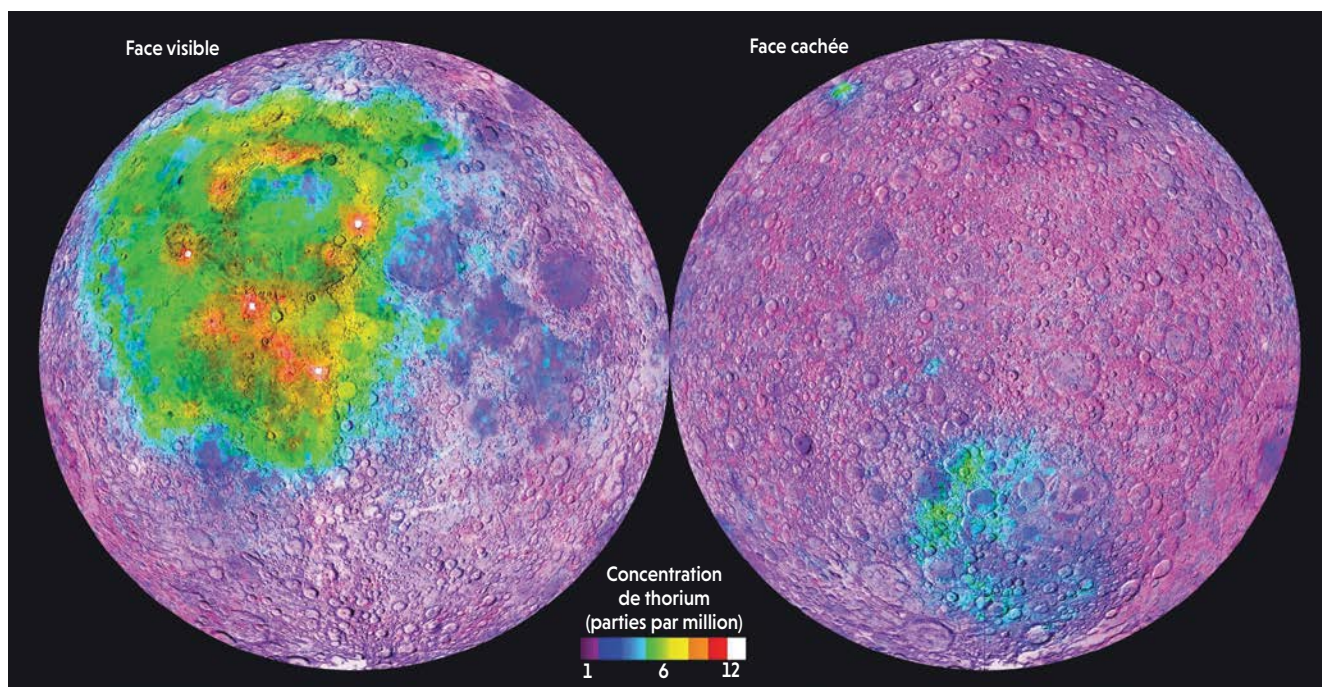




que rapporter des matériaux lunaires sur Terre sera rentable de sitôt. Deux sociétés privées, Deep Space Industries et Planetary Resources, fondées au début du xxi^{e} siècle pour l'exploitation minière d'astéroïdes, ont échoué à attirer des investisseurs. L'idée d'aller chercher des ressources dans l'espace ne séduit pas encore. Les deux entités ont depuis été rachetées, l'une par un fabricant de satellite, l'autre par une société spécialisée dans la cryptomonnaie. « Cette situation est très différente de la ruée vers l'or aux États-Unis, quand n'importe qui possédant une mule et une pioche pouvait tenter le coup », explique George Sowers, un expert des ressources spatiales à l'école des mines du Colorado.

Néanmoins, si des activités économiques se développent dans l'espace, les exploitations minières suivront, selon les experts. Martin Elvis souligne, par exemple, que les sociétés privées de lanceurs spatiaux, comme SpaceX d'Elon Musk, font baisser le coût d'envoi des véhicules dans l'espace. Plus il sera facile et bon marché de voyager dans l'espace, plus les missions se banaliseront. Et la demande associée en ressources encouragera aussi le développement de la filière, d'autant qu'il est plus aisé de faire partir des matériaux depuis la Lune, car son champ de pesanteur est six fois plus faible que celui de la Terre.

Bob Richards compte bien jouer un rôle dans cette aventure qui rapprochera la Lune de la sphère économique terrestre. Mais même lui a des difficultés à dépasser l'atmosphère de la planète. Quand il a cofondé Moon Express, en 2010, la société était l'une des 16 compagnies en lice pour le Google Lunar X Prize. Ce

concours proposait à des entreprises privées de construire un engin spatial qui se poserait sur la Lune, s'y déplacerait et renverrait des photos et des données. Sa date limite, initialement en 2012, a été repoussée jusqu'en mars 2018. Mais en janvier de cette même année, la fondation X Prize a admis qu'aucune équipe n'était en mesure de prétendre à la récompense de 30 millions de dollars.

LA NOUVELLE FRONTIÈRE

Malgré cette déception, Moon Express prévoit d'envoyer sa première sonde en orbite lunaire en 2020, avant de se poser l'année suivante. Il restera ensuite à voir si le modèle économique de l'entreprise – proposer à des agences spatiales et des sociétés privées de transporter leur matériel sur la Lune – est viable à long terme. Quand on lui demande s'il ne voit pas de conflit d'intérêts entre sa volonté de s'approprier des territoires lunaires et le besoin de trouver une solution équitable pour tout le monde, Bob Richards devient philosophe. Les contradictions dans le traité de l'espace sont le reflet du conflit entre les deux systèmes de pensée diamétralement opposés des pays qui l'ont rédigé. Les Soviétiques communistes avaient une vision collective du monde, dans laquelle les biens devaient être répartis de façon équitable, alors que les Américains capitalistes croyaient avant tout à la liberté individuelle et à celle du secteur privé. « Ce clivage explique pourquoi le traité est ouvert à différentes interprétations, explique-t-il. Je pense que les humains ont ici une chance de conquérir de nouvelles frontières vierges sans avoir à s'affronter les uns les autres. » ■

BIBLIOGRAPHIE

Traité de l'espace :
http://bit.ly/PLS501_Space

Association du village lunaire :
<https://moonvillageassociation.org/>

L'ESSENTIEL

> Les échantillons de roche rapportés de la Lune par les astronautes des missions Apollo ont profondément influencé la planétologie.

> Leur étude en laboratoire a livré des informations clés sur l'origine de la Lune et sur l'évolution du Système solaire.

> Cela a aidé au développement d'un modèle de la formation du système Terre-Lune et d'un modèle d'évolution du Système solaire primordial.

> Il faudrait aux scientifiques davantage d'échantillons lunaires pour aller plus loin encore.

L'AUTEURE



ERICA JAWIN
géologue postdoctorante au
Muséum américain d'histoire
naturelle, à Washington

Le précieux butin d'Apollo

Les roches rapportées par les missions Apollo ont si radicalement renouvelé notre vision du satellite de la Terre, que l'une des principales raisons de retourner sur la Lune serait de se procurer de nouveaux échantillons de roches lunaires.





Le plus gros morceau de roche lunaire qui reste de l'échantillon 15556, prélevé durant la mission *Apollo 15*, se trouve à l'intérieur d'un sac en téflon dans une armoire de stockage remplie d'azote du Centre spatial Johnson.

Les missions *Apollo* sont bien connues pour avoir introduit l'humanité sur la Lune. Cependant, leur apport scientifique le plus significatif consiste en 382 kilogrammes de pierres et de régolite, la couche de poussière et de débris créée par les incessants impacts météoritiques sur la surface lunaire. Ce que nous ont apporté ces échantillons de roche et de poussière est incomparable. Ils ont permis de jeter les bases de la planétologie moderne et ils nous ont donné un aperçu crucial sur les processus géologiques à l'œuvre sur tous les corps planétaires.

Je suis née trop tard pour assister à la mission *Apollo 11*, lors de laquelle des hommes ont foulé la Lune pour la première fois, mais les échantillons de roche rapportés des six missions incluant un alunissage ont directement influencé ma carrière de planétologue. Ainsi, pour mener des recherches sur les dépôts des explosions volcaniques à la surface lunaire, j'ai exploité des données obtenues sur des échantillons prélevés directement sur la surface lunaire lors des missions *Apollo 15* et *17*. Et d'autres résultats ont été recueillis par des sondes en orbite autour de la Lune, construites et lancées grâce aux connaissances scientifiques et techniques acquises pendant le programme *Apollo*.

8 000 ÉCHANTILLONS LUNAIRES EN COURS D'ANALYSE

Du reste, Ryan Zeigler, le conservateur des échantillons *Apollo* de la Nasa, explique qu'au cours des 50 dernières années, plus de 500 chercheurs de plus de 15 pays ont demandé, à 3190 reprises, des échantillons lunaires. Au fil des décennies, confie-t-il, l'agence a distribué plus de 50 000 échantillons lunaires; actuellement, 145 astronomes, biologistes, chimistes, physiciens du solide ou encore géologues étudient plus de 8 000 échantillons. Pour impressionnant que soient ces chiffres, les résultats qu'ils ont apportés le sont encore davantage: les roches lunaires ont bouleversé notre vision de la surface de la Lune, de son origine et de l'évolution du Système solaire.

Avant l'envoi d'engins spatiaux et d'astronautes, nos connaissances sur la Lune étaient spéculatives et limitées aux observations possibles depuis la Terre. Elles suggéraient un très grand âge de la surface lunaire, puisque, manifestement, des cratères d'impact s'y étaient accumulés pendant des milliards d'années. Une hypothèse que les géochimistes purent confirmer quand les premiers astronautes sont revenus de notre satellite: grâce aux isotopes (des versions d'atomes d'un même élément chimique différant par le nombre des neutrons) se désintégrant à diverses échelles de

temps présents dans les roches lunaires, ils prouvèrent que celles rapportées de la Lune étaient bien plus anciennes que la plupart des roches terrestres: leurs âges varient entre 3 à 4,5 milliards d'années.

Les planétologues établirent alors un lien, qui influa sur toutes les recherches ultérieures relatives à la Lune et aux autres corps planétaires: ils comparèrent les premiers âges mesurés, ceux des échantillons rapportés du site d'alunissage d'*Apollo 11*, avec le nombre de cratères d'impact des environs de l'endroit où chacun avait été recueilli. Ils utilisèrent les données ainsi produites pour modéliser l'accumulation des cratères à la surface de la Lune. Le modèle obtenu fait des sites d'échantillonnage d'*Apollo* une sorte de pierre de Rosette de la planétologie, qui fournit une méthode d'estimation de l'âge de n'importe quel endroit de la Lune, voire d'autres corps planétaires.

Vieux d'environ 4,5 milliards d'années, le plus ancien échantillon a essentiellement le même âge que la Lune elle-même. La plupart des roches terrestres ont en revanche bien moins de 4 milliards d'années, car sur Terre la tectonique des plaques recycle en permanence la croûte de notre planète. Ce n'est pas le cas sur la Lune, de sorte que les roches lunaires nous renseignent sur les roches des débuts du Système solaire. Il se pourrait même qu'elles nous renseignent sur la Terre jeune.

En mars dernier, des chercheurs ont ainsi publié l'analyse d'une brèche rapportée par *Apollo 14*, c'est-à-dire de l'un de ces conglomerats de débris divers de roche soudés entre eux par quelque liant. Ils avancent que l'un des composants de cette brèche pourrait être d'origine terrestre: il s'agirait d'une roche éjectée de la Terre il y a quelque 4 milliards d'années. Cette météorite d'origine terrestre serait tombée sur la Lune où, plusieurs milliards d'années plus tard, l'astronaute Alan Shepard l'a ramassée et ramenée sur Terre.

Avant les missions *Apollo*, les chercheurs spéculaient sur la formation de la Lune et



Selon la théorie actuelle, la Lune s'est formée à la suite d'une collision géante avec la Terre



Ces quatre échantillons ont été prélevés lors des missions *Apollo 15* (près du Mont Hadley dans les Monts Apennins au sud-ouest de la mer des Pluies), *Apollo 16* (sur un haut plateau lunaire région du cratère Descartes) et *Apollo 17* (dans la vallée Taurus-Littrow, dans une région de hauts plateaux lunaires). Ces trois missions ont été les dernières au cours desquelles des astronautes ont foulé le sol de la Lune.

d'autres satellites planétaires. Certains pensaient que la Terre avait capturé un corps passant à proximité; d'autres, que la jeune Terre tournait si vite qu'une sorte d'énorme «goutte de roche» s'en serait détachée; d'autres encore, que la Terre et la Lune se seraient formées simultanément et en même temps que toutes les planètes du Système solaire à partir du «disque protoplanétaire» originel. Les missions *Apollo* nous ont fait basculer vers de nouvelles conceptions.

LE MODÈLE D'IMPACT GÉANT ET SES FONDEMENTS

Aujourd'hui, la théorie de l'origine de la Lune la mieux acceptée est celle de sa formation à la suite d'un impact géant. Dans cette conception fondée sur les indices recueillis lors du programme *Apollo*, un corps de la taille de Mars, nommé Théia, aurait percuté la Terre il y a quelque 4,5 milliards d'années. Le choc l'aurait fragmenté et aurait éjecté dans l'espace une partie de la croûte et du manteau terrestre (on nomme ainsi les quelque 3600 kilomètres sous la croûte). Les matériaux éjectés se seraient ensuite agglomérés aux restes de Théia, avant de se refroidir pour former notre satellite.

Ce modèle se nourrit de plusieurs faits constatés sur les échantillons lunaires d'*Apollo* ou pendant les expériences de surface réalisées pendant les missions. Passons en revue les principaux d'entre eux.

PEU DE FER. La Lune contient étonnamment peu de fer. Les expériences de géophysique de surface menées durant les missions *Apollo* ont montré que, par rapport aux planètes

telluriques (Mars, la Terre et Vénus, soit les planètes de roches et de métaux), le noyau de la Lune ne représente qu'une petite partie de son volume: son rayon n'est que de l'ordre de 25% seulement de son rayon total (sur la Terre et Mars, de l'ordre de 50%). Ce manque relatif de fer suggère que lors du grand impact, la Terre avait déjà constitué son propre noyau de fer, de sorte qu'il n'est resté que peu de ce métal lorsque la Lune s'est formée.

FORTE SÉCHERESSE. Les échantillons lunaires rapportés par *Apollo* sont extrêmement secs et presque totalement dénués de molécules s'évaporant facilement comme l'eau, le dioxyde de carbone, l'azote ou encore l'hydrogène. Les planétologues expliquent ce fait en avançant que l'énorme quantité d'énergie et de chaleur libérée par l'impact géant aurait chassé les composés volatils des fragments de la proto-Lune.

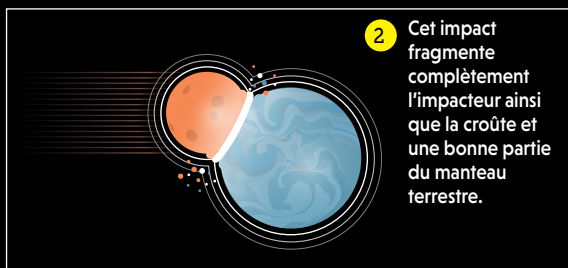
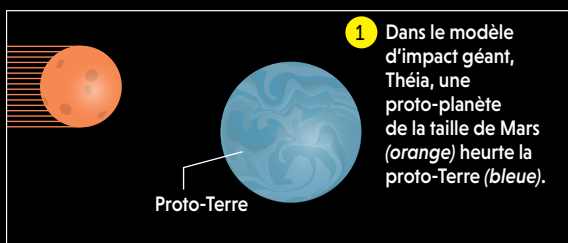
UN OcéAN DE MAGMA. L'une des idées les plus fortes provenant des échantillons lunaires est l'idée qu'il y avait un océan de magma sur la Lune à ses débuts. Des échantillons d'*Apollo 11* montrent que les hautes terres lunaires (les régions visibles de couleur claire qui se distinguent nettement des basses terres sombres constituant les «mers» lunaires) contiennent de fortes concentrations de plagioclase, c'est-à-dire du constituant majeur des roches magmatiques. La texture des roches des hautes terres suggère qu'elles se sont formées à partir d'un grand volume de roche en fusion: lors de son refroidissement, les cristaux de plagioclase, relativement légers, ont migré vers le haut par flottaison. Comme on avait trouvé en d'autres endroits des roches similaires au cours de missions robotisées antérieures et que les hautes terres lunaires sont très étendues, la couche de magma a dû couvrir la plus grande partie ou la totalité de la Lune. Dès 1970, quelque six mois seulement ➤

DEUX MODÈLES DE FORMATION DE LA LUNE

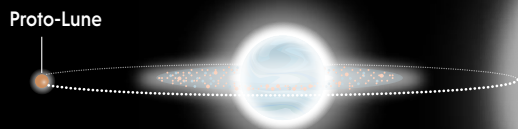
La Lune se serait formée il y a environ 4,5 milliards d'années à la suite d'une collision entre la proto-Terre et une autre protoplanète de la taille de Mars, nommée Théia. L'impact aurait éjecté de la matière de la Terre, qui se serait mélangée avec celle de Théia afin de former la Lune. Toutefois, certaines des propriétés de la Lune, par exemple son extrême pauvreté en éléments volatils en comparaison avec la Terre, s'expliqueraient mieux en supposant la formation d'une synestia, c'est-à-dire d'un nuage annulaire transitoire de débris entourant les noyaux terrestre et lunaire, puis conduisant après un certain tri à l'accrétion de la Terre et de la Lune. Ces deux conceptions dominantes actuellement en planétologie sont détaillées ici.

LE MODÈLE CANONIQUE : CELUI DE L'IMPACT GÉANT

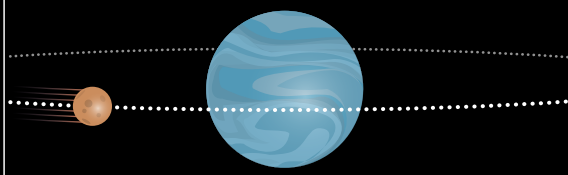
Le modèle de l'impact géant rend compte de nombreuses caractéristiques de la Lune, telles l'existence passée d'un océan magmatique ou son noyau de fer de petite taille.



3 L'impacteur cède à la Terre une grande partie du fer de son noyau, laissant derrière lui un disque constitué par les débris de son manteau.

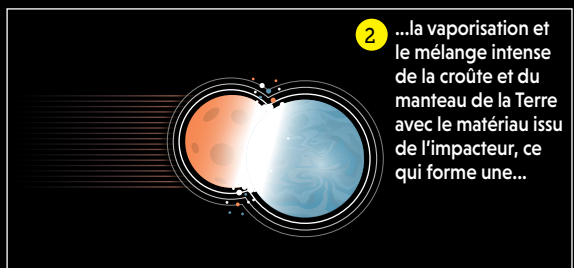
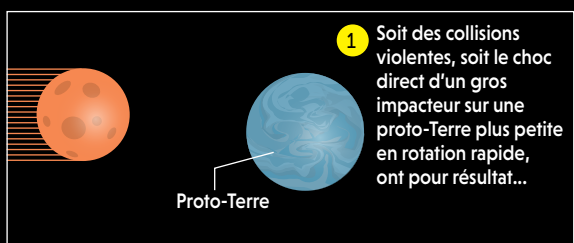


4 La Lune se forme ensuite très vite à partir de ce disque – peut-être en un siècle à peine –, sous la forme d'un océan de magma entourant un petit noyau de fer.

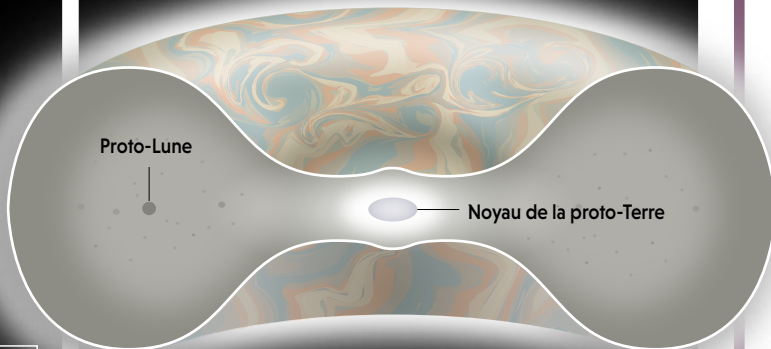


VARIANTE DU MODÈLE CANONIQUE AVEC SYNESTIA

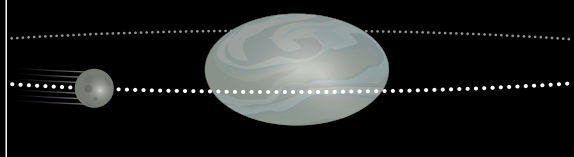
Cette variante du modèle d'impact géant, dans laquelle la Lune se forme, puis mûrit à hautes température et pression, explique mieux certains faits, comme les compositions isotopiques identiques de la Terre et de la Lune ou la rareté des composés volatils sur notre satellite.



3 ...synestia, c'est-à-dire un nuage torique de vapeur et de fragments de roche dans lequel la Lune s'accrète et mûrit en quelques décennies. La plupart des éléments volatils restent dans la vapeur, puis tombent sur Terre au fur et à mesure du refroidissement.



4 Le mélange intime des matières provenant des deux corps dans la synestia expliquerait les compositions isotopiques identiques de la Terre et de la Lune.





Ramassé sur la Lune par les astronautes James Irwin et David Scott sur les bords du cratère Spurr, le *Genesis rock*, qui est l'échantillon 15415 ramené par la mission *Apollo 15*, est vieux d'environ 4 milliards d'années (d'où son surnom). Il a aidé à élaborer la théorie de la formation de la Lune.

> après l'arrivée des premiers échantillons *Apollo*, deux groupes de chercheurs proposèrent, indépendamment l'un de l'autre, l'idée d'un océan magmatique précoce. Plusieurs autres types de données géochimiques ou géophysiques appuient par ailleurs ce modèle d'un océan de magma, qui est toujours en cours d'élaboration aujourd'hui.

L'une des découvertes met toutefois le modèle de l'impact géant au défi. À deux reprises, en 2001 et 2012, des chercheurs ont constaté, en se servant d'un procédé nommé fluoration au laser, que les concentrations isotopiques de l'oxygène et du titane dans les échantillons de roches lunaires sont presque

Des échantillons de pierres lunaires encore sous scellés attendent d'être analysés

identiques à celles des roches terrestres. Cela pose un problème: si la Lune s'est bien formée par mélange de matériaux provenant de la Terre et de Théia, comment les compositions isotopiques en titane et oxygène peuvent-elles être les mêmes dans les deux corps? Cette observation a inspiré de nouvelles propositions quant à la formation de la Lune, dont le modèle à synestia (voir l'encadré page ci-contre).

Les recherches sur les roches lunaires ramenées par *Apollo* nous ont aussi renseignés sur les autres corps planétaires. Le résultat le plus notable de ces avancées est sans doute la mise au point du « modèle de Nice » (ainsi nommé parce qu'il a été conçu à l'Observatoire de la Côte d'Azur, à Nice).

Selon ce modèle de l'évolution du Système solaire, les planètes gazeuses extérieures – Saturne, Uranus et Neptune – se seraient initialement formées plus près du Soleil et à proximité les unes des autres. Puis, quelques centaines de millions d'années plus tard, leurs trajectoires seraient devenues instables, et, sous l'influence d'une incursion de Jupiter vers le Système solaire interne, elles auraient très vite migré vers leurs orbites actuelles, à grande distance du Soleil. Ce mouvement aurait attiré vers l'intérieur du Système solaire de très nombreux matériaux de la ceinture de Kuiper, cette zone située entre 30 et 55 unités astronomiques du Soleil et peuplée de très nombreux petits corps. Ces millions de résidus des premiers moments de la formation du Système solaire seraient alors entrés en collision avec les planètes et leurs lunes, entraînant un chaos général dont témoigne la face grêlée de la Lune.

UN CURIEUX SCÉNARIO

Un tel scénario semble tiré par les cheveux, mais il explique avec élégance un certain nombre d'observations sur notre voisinage cosmique. Après avoir daté les échantillons d'*Apollo* et analysé les cratères d'impact, les chercheurs ont par exemple conclu que le nombre d'impacts a connu un pic, dû à un « Grand bombardement tardif » qui se serait produit environ 700 millions d'années après la formation des planètes. On ne savait pas expliquer ce soudain bombardement intense des planètes telluriques, mais le modèle de Nice a fourni une explication en prédisant l'attraction massive de corps de la ceinture de Kuiper vers l'intérieur du Système solaire exactement à l'époque du chaos dont témoigne la face grêlée de la Lune.

En plus de nous renseigner sur l'évolution du Système solaire, les échantillons lunaires nous ont aussi permis d'étudier l'évolution chimique des surfaces planétaires. Le processus dit de l'« érosion spatiale » explique de quelle façon les corps dépourvus d'atmosphère s'érodent. L'étude des échantillons prélevés à la surface de la Lune par les missions *Apollo* a montré qu'ils sont composés d'agglomérations de verre fondu et de fragments minéraux créés par l'impact de microscopiques poussières. Ces agglomérats, qui se forment avec le temps, peuvent constituer de 60 à 70% des échantillons de régolite mature. De minuscules perles de fer élémentaire sont aussi produites au cours de l'érosion spatiale et s'accumulent sur >



On voit ici un dispositif de conservation, en cours de manipulation pour déplacer un échantillon provenant de la mission Apollo 15 depuis son armoire de rangement sous azote vers un conteneur en acier inoxydable.

> les bords extérieurs de certains grains du sol, ce qui assombrit leurs surfaces avec le temps. Nous savons aujourd'hui que le rayonnement solaire, les grandes fluctuations de température et le bombardement constant par de minuscules micrométéorites contribuent tous à l'érosion spatiale.

DES ÉCHANTILLONS POUR L'AVENIR

La période actuelle de la science lunaire est passionnante: cette année, des échantillons préservés depuis leur collecte sur la Lune et faisant partie de ceux que la Nasa a intentionnellement mis de côté, dans l'attente de techniques d'analyse plus performantes que celles de l'ère *Apollo*, seront mis à disposition des chercheurs. En mars, neuf équipes de chercheurs ont ainsi été sélectionnées pour recevoir des échantillons d'*Apollo 15*, *16* et *17* non ouverts et scellés sous vide. Cette étape du programme ANGSA (*Apollo Next Generation Sample Analysis*) devrait conduire à de nouvelles connaissances sur la formation et l'évolution de notre satellite.

Si nous avons beaucoup appris des échantillons et des expériences de surface d'*Apollo*, nous avons aussi un grand besoin de nouveaux échantillons. Nous n'avons ainsi aucune roche issue de la face cachée de la Lune, de ses régions polaires ou encore de son intérieur profond. Deux types d'échantillons dont j'aimerais particulièrement disposer seraient de la glace d'un cratère polaire et des roches issues du bassin d'Aitken, sur la face cachée, qui recouvre le pôle Sud et constitue le plus grand cratère d'impact de la Lune. Son intérieur

pourrait contenir des matériaux provenant de la partie inférieure de la croûte lunaire et même de son manteau rocheux (la couche sous-jacente à la croûte). L'étude du bassin Aitken du pôle Sud nous aiderait à comprendre pourquoi de très grands bassins façonnent les surfaces et les intérieurs des corps planétaires. Disposer d'un échantillon de glace polaire lunaire nous renseignerait sur l'âge et l'origine de l'eau lunaire – ce qui pourrait aider à clarifier ceux de l'eau de la Terre.

De tels échantillons pourraient provenir tant de missions habitées que de missions robotisées: aucun consensus n'existe entre planétologues sur le caractère préférable de l'un ou l'autre type de mission. De nombreux experts soutiennent, à juste titre, que les missions robotisées sont moins coûteuses, plus sûres et peuvent durer plus longtemps que les missions humaines. Pour autant, les humains sont plus à même que les robots de prélever la plus grande variété possible de spécimens inhabituels, ce dont témoignent la diversité des origines géologiques de la composition et des âges des échantillons d'*Apollo*.

Le programme *Apollo* reste un accomplissement sans pareil. Alors que nous célébrons le 50^e anniversaire du «grand pas pour l'humanité» de Niels Armstrong, le premier astronaute sur la Lune, aucun humain n'a, depuis Harrison «Jack» Schmitt et feu Gene Cernan de la mission *Apollo 17* de décembre 1972, foulé un autre corps planétaire. En tant que chercheuse profondément inspirée par le programme *Apollo*, je travaille activement à créer un nouvel «élan *Apollo*» afin que nous puissions enfin revoir des humains explorer l'inconnu. ■

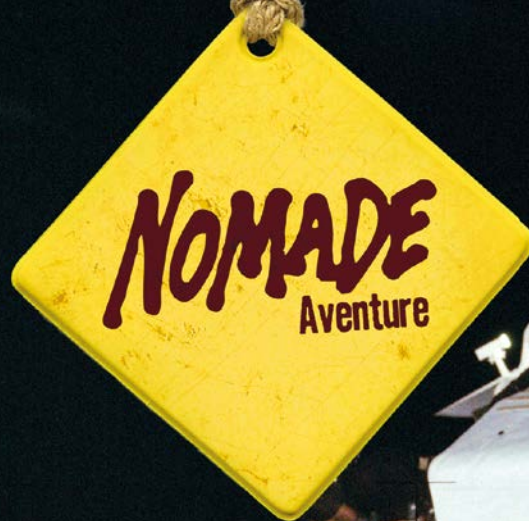
BIBLIOGRAPHIE

S. J. Lock et al., **The origin of the Moon within a terrestrial synestia**, *JGR Planets*, vol. 123(4), pp. 910-951, 2018.

M. Laneuville, **La Lune, une histoire pleine de surprises**, *Pour la Science*, n° 466, pp. 26-35, août 2016.

R. Canup, **Forming a Moon with an Earth-like composition via a giant impact**, *Science*, vol. 338, pp. 1052-1055, 2012.

M. Čuk et al., **Tidal evolution of the Moon from a high-obliquity, high-angular-momentum Earth**, *Nature*, vol. 539, pp. 402-406, 2016.



PARTEZ SUR LES TRACES DES

Explorateurs
DE L'ESPACE

Avez-vous déjà imaginé voir la véritable capsule Vostok de **Gagarine**, visiter l'émouvante maison de **Konstantin Tsiolkovski**, fondateur de l'astronautique, ou encore pénétrer dans la confidentielle **Cité des Etoiles**, base d'entraînement des cosmonautes russes ? Et tout cela, accompagné par le spationaute **Jean-Pierre Haigneré**, recordman français de durée dans l'espace (209 jours) ? Ou **revivre l'épopée de la conquête de la Lune**, et visiter le National Air and Space Museum à Washington, le Space Center de **Houston**, le Kennedy Space Center à **Cap Canaveral**, rencontrer un **astronaute américain** et peut-être même assister à un lancement ? Tout en profitant du savoir et des anecdotes de **Charles Frankel**, spécialiste de la géologie des planètes et auteur de « L'aventure Apollo - Comment ils ont décroché la Lune » (Dunod) ? **C'est désormais possible !**

☎ 01 46 33 71 71 • WWW.NOMADE-AVENTURE.COM/ESPACE