

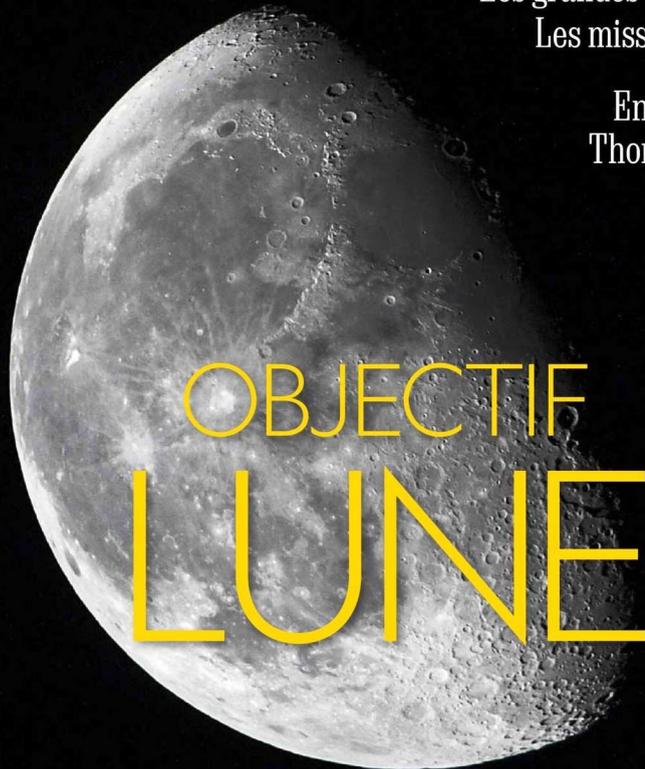
 NATIONAL
GEOGRAPHIC
FRANCE

HORS-SÉRIE

OCTOBRE-NOVEMBRE 2023

Les premiers pas
Les grandes découvertes
Les missions futures

—
Entretien avec
Thomas Pesquet



OBJECTIF
LUNE

BE: 7,9 € - CH: 19 CHF - CA: 12,99 CAD - LU: 7,9 € - DK: 10DK - FR: 7,9 € - GB: 7,9 £ - GR: 12,99 € - IE: 7,9 € - IT: 7,9 € - JP: 1000 ¥ - NL: 7,9 € - NO: 100kr - PL: 12,99 zł - PT: 7,9 € - SE: 100kr - SK: 1000s - SI: 7,9 € - TR: 100kr - US: 12,99 \$ - ZA: 100kr

PM PRISMA MEDIA

L 15607 - 64H - F: 6,90 € - RD



Photographie prise par
Thomas Pesquet en
mai 2021 depuis la Station
spatiale internationale.



KIT 2 VALISES OFFERT

+ 1200€ EN ACCESSOIRES OU
EN AIDE À LA REPRISE

TIGER 1200 PT TIGER 1200 PR2 TIGER 1200 PR5 TIGER 1200 RALLY EXPLORER

OFFRE VALABLE POUR TOUTE MOTO NEUVE COMMANDÉE ET LIVRÉE AVANT LE 31 OCTOBRE 2023
CHEZ LES CONCESSIONNAIRES PARTICIPANTS - OFFRE NON-CUMULABLE

triumphmotorcycles.fr



FOR THE RIDE

Pour les trajets courts, privilégiez la marche ou le vélo #SeDéplacerMoinsPolluer

« Fly Me to the Moon »

Avant de devenir réalité, voyager sur la Lune a été un fantasme au long cours, un vieux rêve de l'humanité dont les premières traces remontent à l'Antiquité. C'est à l'écrivain grec Lucien de Samosate que l'on doit sa première expression connue. Au I^{er} siècle de notre ère, pastichant Homère, celui-ci composa une parodie de *L'Odyssée* baptisée *L'Histoire véritable*, dans laquelle des marins se trouvaient emportés par une bourrasque jusque sur notre satellite pour assister aux combats entre ses habitants et ceux du Soleil. Les variations littéraires se sont poursuivies depuis, jusqu'à ce que le songe prenne corps.

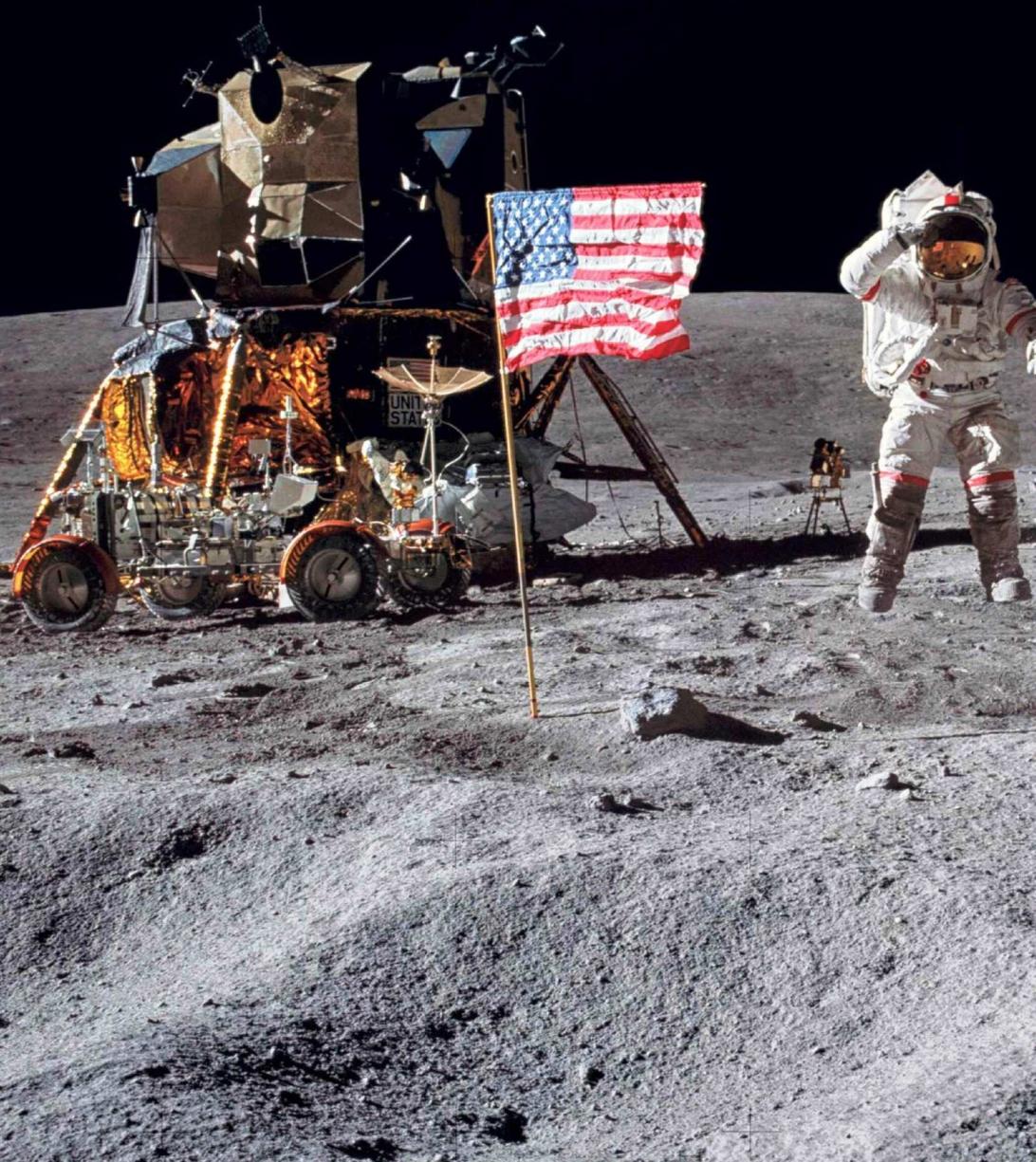
Il n'est guère étonnant que nos premiers pas sur ce brillant objet de désir, si proche et pourtant si longtemps hors d'atteinte, constituent l'une des dates les plus marquantes de la chronologie humaine. Après Neil Armstrong et Buzz Aldrin, le 21 juillet 1969, une poignée d'astronautes américains ont foulé le sol lunaire jusqu'au 14 décembre 1972, où a pris fin la dernière mission habitée sur place à ce jour. L'exploitation des matériaux récoltés durant cette brève parenthèse n'a pas cessé depuis, tandis que des sondes ont continué à être envoyées sur la Lune, nous éclairant sur l'astre, mais aussi sur les origines du système solaire.

Cependant, l'âge héroïque de l'exploration humaine de notre satellite semblait appartenir à l'histoire, page glorieuse d'un passé déjà poussiéreux. Mais voilà que, après cinquante ans d'éclipse, renvoyer des hommes sur la Lune figure à nouveau au cœur des agendas géopolitiques. Le premier acte de ce grand retour devrait avoir lieu fin 2025 ou début 2026, avec la mission *Artemis III*, selon le calendrier de la Nasa.

En ce XXI^e siècle, les règles du grand jeu spatial ont changé. La course à la Lune ne se résume plus à un face-à-face entre deux superpuissances, mais voit se multiplier les acteurs, étatiques (Chine, Inde, Japon, Émirats arabes unis, Europe...) et privés. Un nouveau casting pour de nouveaux enjeux : prendre pied durablement sur le sol lunaire, avec la perspective d'une possible exploitation de ses ressources minières. Et faire de la Lune une répétition générale, un tremplin pour accomplir un autre bond de géant, les premiers pas sur Mars... et au-delà.

MARIE-AMÉLIE CARPIO

Rédactrice en chef adjointe



UNIT
STA

SOMMAIRE

INTERVIEW

Thomas Pesquet : la Lune dans le viseur

6

INTRODUCTION

Un objet de fascination

12

CHAPITRE 1

RENDEZ-VOUS AVEC LA LUNE

16

Astre le plus visible du ciel nocturne, la Lune inspire les observateurs depuis des millénaires. Les cultures et les religions l'ont mise à l'honneur, tandis qu'elle attisait les spéculations des scientifiques.

CHAPITRE 2

UN PAS DE GÉANT POUR L'HUMANITÉ

38

Il y a cinquante-quatre ans, la Nasa a envoyé les premiers hommes sur la Lune. Les astronautes pionniers d'*Apollo 11* ont découvert la marche en apesanteur et le premier lever de Terre de l'humanité.

CHAPITRE 3

LES GRANDES DÉCOUVERTES

60

Les scientifiques ont réalisé d'innombrables recherches à partir des données et des échantillons rocheux récoltés par les missions *Apollo* et par diverses sondes. Leurs travaux ont éclairé tout un pan de l'histoire lunaire.

CHAPITRE 4

RETOUR VERS LE FUTUR

108

En dépit des découvertes déjà réalisées, de nombreux mystères demeurent. Divers pays se lancent aujourd'hui dans des programmes spatiaux ambitieux pour fouler à nouveau notre fascinant satellite.

En 1972, John W. Young, commandant d'*Apollo 16*, rebondit sur la surface lunaire.



THOMAS PESQUET : LA LUNE DANS LE VISEUR

L'astronaute préféré des Français a des chances d'être parmi les prochains humains à poser le pied sur la Lune! En attendant, il l'a photographiée plusieurs fois depuis l'ISS. Il évoque pour *National Geographic France* l'importance scientifique des futures missions lunaires et le rôle de la photographie spatiale.

La Lune est l'objet céleste le plus visible de notre planète. Est-ce un astre qui vous a inspiré, avec lequel vous ressentez un lien particulier ?

C'est vrai que la Lune est un astre qui nous a toujours fascinés sur Terre. D'où les nombreuses cultures, divinités et mythes qui y font référence... La génération d'astronautes à laquelle j'appartiens était toutefois dans une situation particulière comparée à la génération précédente : nous n'avions pas vécu en direct les alunissages des missions *Apollo* dans les années 1960-1970. Si bien que nous n'avions pas le même rapport à notre satellite. Pour nous, il n'était pas un objectif concret, mais quelque chose de plus flou, lointain – un rêve inaccessible. Notre présent, ce à quoi nous travaillions, c'était la *Station*

spatiale internationale. J'ai été sélectionné comme spationaute en 2009, et pendant dix ans, l'ISS a été mon horizon... Mais lorsque je suis revenu de ma seconde mission, en 2021, la Lune s'était rapprochée de nous avec le programme *Artemis*. Alors que je ne l'avais jamais vraiment envisagée, l'idée d'aller sur la Lune a basculé dans le domaine du possible.

***Artemis III* doit se poser sur la Lune fin 2025. Qui a des chances d'être sélectionné et sur quels critères ?**

Avant tout, il y a une étape incontournable : *Artemis II*, qui devrait être lancée l'an prochain avec quatre personnes à bord pour orbiter autour de la Lune. Même si les équipes sont déjà à pied d'œuvre, la question d'*Artemis III* ne se posera officiellement qu'après le succès d'*Artemis II*. Pour faire partie de l'équipage, il faut que l'agence spatiale à laquelle vous appartenez ait un rôle dans cette mission. Je travaille pour l'Esa (Agence spatiale européenne), et il se trouve qu'elle est impliquée puisqu'elle fournit le module de service Orion et plusieurs éléments techniques de navigation, de propulsion, etc. Autre point qui sera crucial : il faudra des gens expérimentés, qui ont fait leurs preuves sur l'ISS, ont fait des sorties extravéhiculaires, ont été aux commandes de la station... En Europe, nous sommes six, environ, à avoir le bagage nécessaire.

Mais, bien sûr, il n'y aura pas que des Européens. Il y a évidemment les astronautes américains, mais aussi ceux des agences canadienne et japonaise qui font partie des accords *Artemis* avec la Nasa. Et d'autres nations commencent également à montrer leur intérêt, comme les Émirats arabes unis.

L'entraînement sera-t-il spécifique pour cette mission par rapport à celui pour l'ISS ?

Autant une mission à bord de l'ISS, longue de plusieurs mois, peut être vue comme un marathon, autant un



De nombreux appareils et objectifs flottent dans tous les recoins de la *Station spatiale internationale*.



À travers un hublot
de la coupole de
l'ISS, en juin 2021,
Thomas Pesquet
se trouvait au
bon moment pour
attraper la Lune
dans son objectif.



La Lune dans les dernières lueurs du crépuscule, prise en photo par l'astronaute depuis le segment russe de l'ISS.

voyage pour la Lune est plutôt un sprint de dix à douze jours. Il y aura forcément des différences majeures dans la préparation. L'ISS n'est qu'à un peu plus de 400 km de la Terre, nous restons dans un voisinage proche. Nous sommes ravitaillés, il n'y a pas de problème de communication : le centre de contrôle est joignable en permanence, et il gère beaucoup de choses à distance pour nous. Et puis, il y a tellement d'éléments à connaître que, pour 50 % des activités à mener, nous ne sommes pas vraiment entraînés. Ça prendrait trop de temps...

Pour la Lune, en revanche, qui est située à près de 400 000 km soit à trois jours de trajet minimum de la Terre, ce sera autre chose. Il faudra revoir et adapter tout le concept opérationnel, car nous serons seuls. L'équipage devra connaître par cœur chaque point de la mission, comme au temps de la navette spatiale américaine (ndlr : en service de 1981 à 2011), car on ne peut pas se permettre d'avoir des surprises. Ce qui impliquera un entraînement plus intense, plus physique, plus spécifique... On aura aussi sans doute plus d'indépendance, au moins pour les premières missions. À terme, elles seront plus longues, jusqu'à 90 jours quand la station orbitale lunaire *Gateway* et la base du pôle Sud lunaire seront opérationnelles.

Pourquoi retourner sur la Lune ?

Il y a déjà tout un volet scientifique. La Lune peut offrir un site d'observation incroyable, et des possibilités de recherche, sur l'origine de la vie par exemple, inégalées. Mais il s'agit aussi de se remettre en capacité physique de mener ce genre d'exploration. La façon de procéder

ne change pas, que l'on soit sur Terre ou dans l'espace... On a affaire à un territoire inconnu, et on y envoie des individus résistants. Puis des professionnels y vont à leur tour, et enfin le grand public. Sur la Lune, ce sera la même chose : on a envoyé les premiers explorateurs au tout début de la conquête spatiale, il y a une cinquantaine d'années, et ils ont réussi. Puis, des astronautes professionnels leur ont succédé pour consolider ces acquis, et maîtriser cet environnement particulier. Si bien qu'aujourd'hui, avec les stations spatiales, on a une présence humaine continue dans l'espace depuis plus de vingt ans. Maintenant, l'espace s'ouvre à la sphère privée... et les perspectives évoluent.

De quelle façon ?

La Lune est un objectif en soi, mais elle est aussi une étape, une répétition générale. Car le Grand Prix, d'une certaine façon, c'est Mars. En fonction des orbites respectives de la Terre et de la planète Rouge, il faut parcourir entre 40 millions de kilomètres (soit un voyage de 300 jours) et 400 millions de kilomètres sans possibilité de faire demi-tour. On ne peut pas y aller tout de suite. Nous devons d'abord maîtriser la Lune. Ça paraît encore loin mais, pour la première fois depuis les années 1990, on a un vrai programme lunaire, un vrai calendrier avec, en ligne de mire, un alunissage en 2025 – le premier depuis les missions *Apollo*. Suivront les missions *Artemis IV-V-VI*, programmées avant 2030, l'établissement d'une base au pôle Sud et l'assemblage du *Gateway* en orbite pour 2035-2040. Avec les connaissances que l'on aura acquises, on pourra alors se tourner vers Mars.

Que répondez-vous à ceux qui disent que c'est une débauche de moyens qui n'apporte pas grand-chose ?

C'est simple : pour toute l'Europe, le budget de l'exploration spatiale, les rovers ou les sondes, ça représente 600 millions d'euros par an. Soit moins que le budget du PSG. C'est donc finalement bien peu... Qu'est-ce que ça nous apporte ? J'ai un exemple très concret : une large partie de ce que l'on sait du changement climatique, on le doit aux programmes spatiaux, aux flux de données de satellites qui observent en direct et en permanence notre planète depuis l'espace - évolution de la température de l'eau, du taux de CO₂, de méthane, etc. Car il y a des choses qu'on ne peut voir que depuis là-haut.

Ne vaudrait-il pas mieux envoyer des robots plutôt que des hommes ?

La présence humaine est nécessaire. Il est bien sûr plus compliqué d'envoyer des hommes dans l'espace, car nous sommes fragiles, nous devons respirer, les radiations nous tuent... Mais le retour d'expérience est incomparable. Le rover *Curiosity*, sur Mars, pouvait faire 50 m par jour. Sur la Lune, nos astronautes dans leur petit véhicule ont parcouru jusqu'à 36 km. L'homme et la machine sont les deux faces d'une même pièce, deux aspects d'une même mission.

Quid de la coopération entre États ? Les tensions géopolitiques sur Terre rejaillissent-elles parfois dans l'espace entre les membres d'équipage ?

À notre niveau, nous en faisons abstraction, car nous sommes avant tout concentrés sur nos missions. Et puis, nous nous connaissons depuis des années, donc nous avons appris à vivre ensemble. Cependant, nous évitons de parler de certains sujets comme la politique ou la religion... Au niveau des États, c'est plus compliqué. La Russie, par exemple, ne fait pas partie du programme *Artemis*. Quant à la Chine et à l'Inde, elles investissent dans le spatial de leur côté. Malgré ces tensions inter-États, on ne peut pas s'interdire d'explorer notre futur, de se poser des questions plus fondamentales. On verra dans dix ou quinze ans les conséquences de la situation actuelle. Mais ce qui est sûr, c'est que la grande mission du futur vers Mars, elle, sera mondiale.

Vous évoquiez les pionniers de l'aventure lunaire. Avez-vous eu l'occasion de les rencontrer ?

Certains, oui, notamment Buzz Aldrin. C'était l'été 2009, je venais juste d'être sélectionné par l'EsA et je n'avais pas encore commencé mon entraînement. Il a eu deux conseils très simples : respecter les anciens... et être patient ! Il avait raison, bien sûr. On voudrait tous que ça aille plus vite, aller dans l'espace tous les ans - j'ai attendu sept ans avant de faire ma première mission. Mais ce temps est important, car c'est une attente active, productive. L'expérience des astronautes d'*Apollo* est à prendre en compte à tous les niveaux, pas seulement en ce qui concerne la mission. Il y a tout ce qui se passe après. À mon échelle, je n'ai vécu qu'une fraction de ce qu'ils ont dû traverser. Comment garder la flamme quand on se retrouve à répondre toujours aux mêmes questions, « Comment c'est l'espace ? » « Qu'est-ce qu'on mange ? », et surtout comment gérer l'après, quand on a connu quelque chose d'aussi fort et qu'on ne sait pas s'il y aura une prochaine mission, et si oui, quand ? Comme lorsque l'on gagne une médaille olympique : que faire pour conserver l'adrénaline, retrouver une telle intensité ? On est dans une position un peu spéciale quand l'on se dit que rien de ce que l'on connaîtra « après » ne pourra jamais égaler ces moments, même si on a 40 ans et qu'on doit vivre encore autant d'années.

Le partage des photos de l'ISS a bouleversé notre vision de notre planète et du travail des astronautes.

Cela peut-il avoir le même effet pour la Lune ?

Bien sûr ! À l'époque de la station *Mir* (ndlr : en service de 1986 à 2000), les missions n'étaient connues que par quelques images de mauvaise qualité de cosmonautes partant du Kazakhstan et revenant six mois plus tard. Et c'était tout. Désormais, on peut partager notre quotidien à bord de l'*ISS*. Pour la Lune, ce sera pareil, en juste un peu plus compliqué techniquement, même si on parle d'installer un réseau de communication - d'abord pour échanger des informations de travail, des questions techniques. Mais il nous permettra peut-être aussi d'avoir un astronaute européen qui filmera en 4K et diffusera en direct ses premiers pas sur le sol lunaire. La nécessité de diffuser les images de ce que l'on fait est bien intégrée

par la Nasa. On ne peut plus, aujourd'hui, dire « je suis en orbite » sans le montrer. Prenez le futur *Gateway* : des fenêtres ont d'office été prévues, alors que, traditionnellement, les ingénieurs font tout pour s'y opposer car cela crée des faiblesses dans la structure, des risques de perte d'étanchéité. Nous aurons bien des images.

Ces photos sont-elles utiles à votre travail, ou sont-elles surtout destinées au grand public ?

La fonction première de ces clichés n'est pas d'alimenter nos réseaux sociaux, mais de nous permettre d'être le plus efficace possible dans notre mission ! Nous suivons d'ailleurs quelques cours avant de partir. En cas de casse de matériel, par exemple, une photo montrant le problème est plus parlante que des mots. Si bien que dans la station, il y a une quinzaine de petits boîtiers reflex numériques tout simples disséminés un peu partout. Et nous avons également beaucoup d'objectifs différents : grand angle pour les prises de vue à l'intérieur de l'ISS, Fisheye, 35 mm, mais aussi 800 mm, 400 mm, 50-500 mm, etc. En général, avec mes coéquipiers, on les associait à un boîtier dédié et placé à un endroit stratégique : certains pour faire de la photo macro si on avait cassé une vis, d'autres pour des vues de la Terre, etc.

Quelles sont les spécificités de la photographie spatiale ? Et quelles sont les situations où vous avez pu commettre des erreurs de débutant ?

Il y a une progression dans notre approche de la photo, à mesure qu'on évolue dans ce que l'on cherche, que l'on essaie de travailler notre composition, etc. Pour les photos de la Terre, il y a plusieurs façons de faire en fonction des possibilités et de l'intention. On peut passer à côté d'une fenêtre, trouver la vue magnifique et attraper un appareil pour prendre la photo en mode automatique. Si on dispose de plus de temps, on peut zoomer et opter pour des objectifs de plus en plus grands. Mais plus ils sont grands, plus l'opération est difficile. Se repérer, déjà, n'est pas évident, car on a en face de soi des zones de 2 000 km sur 2 000 km. Il m'est arrivé, au début, de me dire que j'avais fait une belle image de Rome, alors que j'avais pris une photo de Lyon ! Surtout, il faut réussir à retrouver à l'objectif ce qu'on a

identifié de visu. Cela s'apprend. Il faut près de six mois pour devenir un peu habile à cette gymnastique de changement d'échelle.

Autre détail : si l'on a une belle vue depuis la coupole d'observation panoramique de l'ISS, on ne peut y utiliser d'objectif au-delà de 200 mm parce que ses vitres ne sont pas bonnes optiquement. D'autres fenêtres sont bien meilleures. Quand on veut faire du 400 ou du 800 mm, on utilise par exemple celles du laboratoire américain. Et puis il y a le défi des photos de nuit, qui demandent de s'assurer d'une foule de paramètres auxquels on ne s'attend pas. Il faut fixer la caméra sur un bras articulé dédié pour éviter les mouvements parasites, gérer les vitesses d'obturation pour que les étoiles ne se transforment pas en simples traits, bloquer tous les reflets – et ils sont nombreux, entre les Led qui clignotent, les lumières techniques, les voyants des ordinateurs, etc. Sans compter que les fenêtres ont sept épaisseurs de vitre. C'est donc particulièrement complexe de ne pas avoir d'éclats sur nos photos, au point qu'on a des sortes de voiles en tissu pour les bloquer.

Vous avez vous-même indiqué avoir beaucoup progressé en photo... Comment voyez-vous la suite ?

Comme c'est une discipline qui m'a vraiment intéressé, je me suis beaucoup renseigné de mon côté, j'ai consulté des experts de la Nasa. Mais à un moment, j'ai compris que j'arrivais aux limites de ce que je pouvais faire seul, et je me suis tourné vers des photographes professionnels, comme Laurent Ballesta et Vincent Munier, ou mon ami Ludwig Wallendorff. Quand je comparais nos clichés, je voyais clairement que je n'étais pas au niveau. J'ai compris que ce qui me manquait, c'était surtout la partie traitement de l'image. Mes photos prises depuis l'ISS étaient quasiment brutes : je n'avais ni le temps, ni les moyens logiciels de les retoucher. Désormais, je les reprends pour les traiter et les améliorer.

Je réfléchis à tirer un « Top 50 » de mes 245 000 images. C'est incroyablement difficile de trier, mais il y a tout de même certaines photos qui sortent du lot, comme celle de cette aurore boréale avec le bras robotique de l'ISS, ou celle de la rentrée de *Crew-1* dans l'atmosphère qui laisse derrière lui une traînée de feu.

Parmi vos 245 000 photos, on en trouve très peu de la Lune, paradoxalement...

Oui, j'en ai peut-être quatre ou cinq seulement. Tout simplement parce que la plupart des fenêtres et hublots sont orientés vers la Terre : ils sont situés en bas ou sur le côté de la station. Si l'on veut photographier la Lune, il faut opter pour les ouvertures sur le côté, et ce ne sont ni les plus grandes ni celles devant lesquelles on passe le plus souvent. Autre point : nous avons notre propre vitesse, et elle, sa propre trajectoire, si bien qu'elle file très vite - nous disposons de quelques minutes à peine pour la voir. Autant il est facile de savoir quand on va passer au-dessus de Paris, autant, pour la Lune, nous manquons de repères. Je ne savais jamais quand elle allait apparaître - on aurait toujours pu demander à la Nasa, mais ce n'était pas vraiment la mission. Si je la voyais se profiler quand j'étais à la coupole, je devais me dépêcher de rejoindre un autre spot avec mon matériel pour la prendre en photo.

Toutes ces images contribuent à rendre ces missions plus concrètes pour le grand public. Certaines œuvres de science-fiction jouent-elles aussi ce rôle ?

Je ne suis pas trop versé dans le *space opera*, j'aime quand la SF est « réelle », crédible, et qu'elle nous parle de conquête spatiale. Il y a effectivement eu des choses intéressantes récemment, comme les films *Gravity*, *Interstellar*, ou encore *Seul sur Mars* que j'ai trouvé très réaliste dans ce qu'il montre, ce qu'il est possible de faire, l'ambiance, les interactions de l'équipage et l'humour. Il y a des réactions qui me rappellent ce que j'ai vécu moi-même. Et un peu avant, on peut citer des films comme *L'Étoffe des héros* ou *Apollo XIII*.

Toute mission, à un moment, a sa séquence catastrophe façon *Apollo XIII*. Lors de la première à laquelle j'ai participé, notre équipe a perdu une protection thermique lors d'une sortie extravéhiculaire. Il a fallu improviser. Dans ces cas-là, comme dans le film, on contacte le centre de contrôle, et là-bas, vous avez ces gars qui voient ce qu'il est possible de faire avec ce que vous avez sous la main. Ils réfléchissent à ça en direct, avec tout le matériel répandu autour d'eux, par terre, pour résoudre le problème et vous dire quoi faire.



Thomas Pesquet dans sa combinaison pressurisée SpaceX pour rejoindre l'ISS, en 2021.

Qu'est-ce qui pousse l'homme à se lancer dans de telles aventures, à affronter de tels risques ?

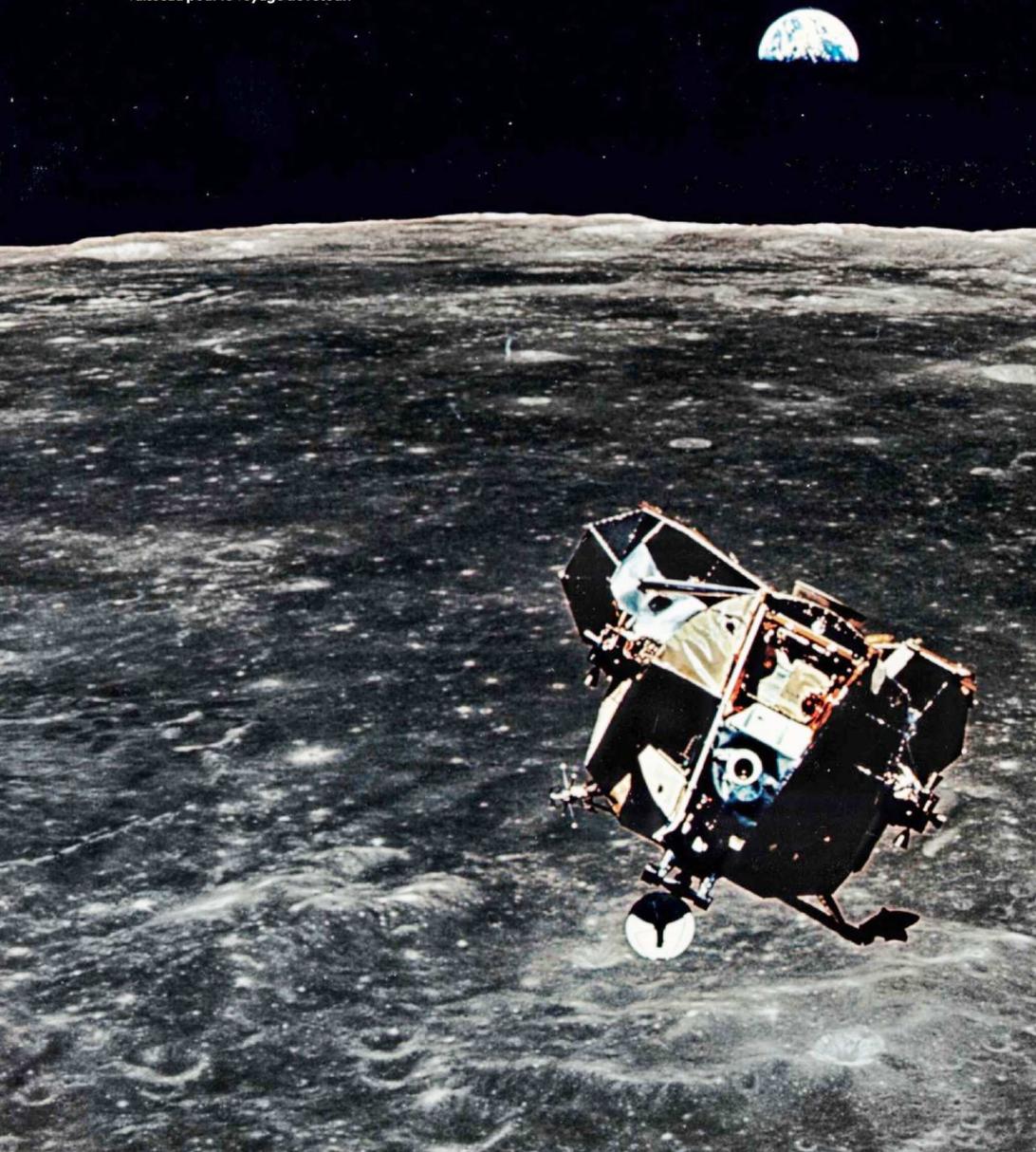
Aujourd'hui, on a réduit le monde pour le mettre à notre niveau. Tout a été rapetissé. Or, nous avons besoin, depuis toujours, de choses qui nous dépassent. Nous avons besoin de choses qui nous font vibrer pour traverser la vie, aller de l'avant. Si notre planète ne peut plus nous offrir cela, il restera toujours l'espace - on ne peut pas rapetisser l'espace. Si vous voyagez à 1000 km/h, comme un avion de ligne, sans vous arrêter, il vous faudrait 500 ans pour aller du Soleil à la périphérie de notre Système solaire. C'est pour ça qu'autant de gens continuent à lever les yeux vers le ciel, pour continuer à rêver.

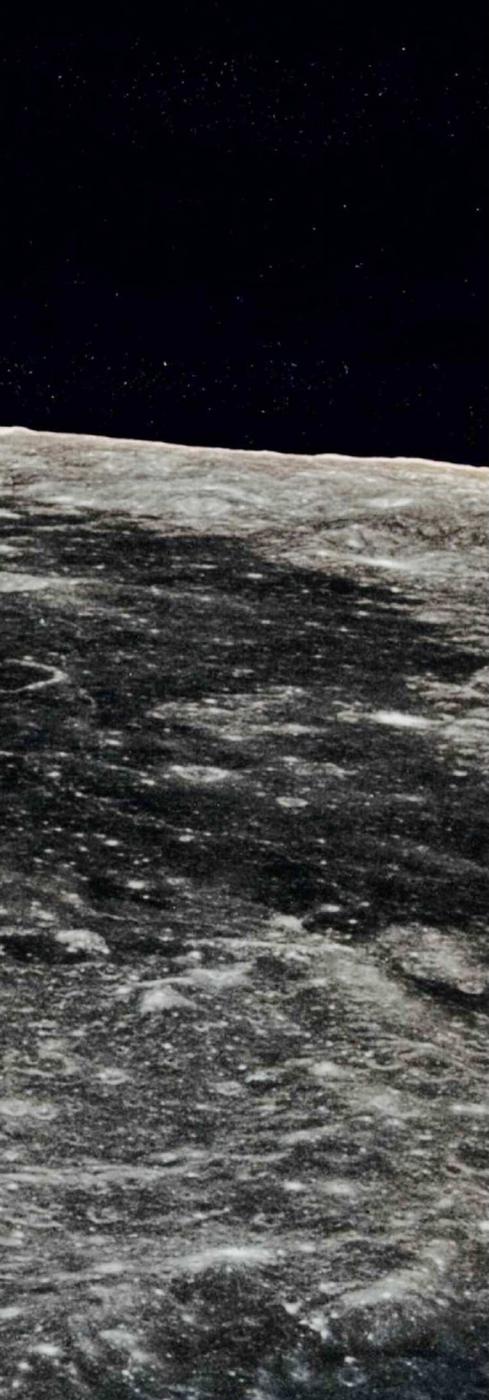
Je pense aussi que l'exploration est un moyen de répondre à nos peurs, en tant qu'individu et en tant qu'espèce. Nous avons besoin d'aller voir, de regarder, de savoir. Quand on a demandé un jour à l'alpiniste anglais George Mallory pourquoi il voulait escalader l'Everest, il répondit : « Parce qu'il est là »... Voilà. Ça ne s'arrêtera jamais. Le monde hier, aujourd'hui l'ISS, demain la Lune, et après-demain, nous irons encore plus loin. ■

Propos recueillis par

Émilie Rauscher et Frédéric Vallois

Il y a cinquante-quatre ans, les premiers hommes à avoir marché sur la Lune rejoignaient leur vaisseau pour le voyage de retour.





INTRODUCTION

UN OBJET DE FASCINATION

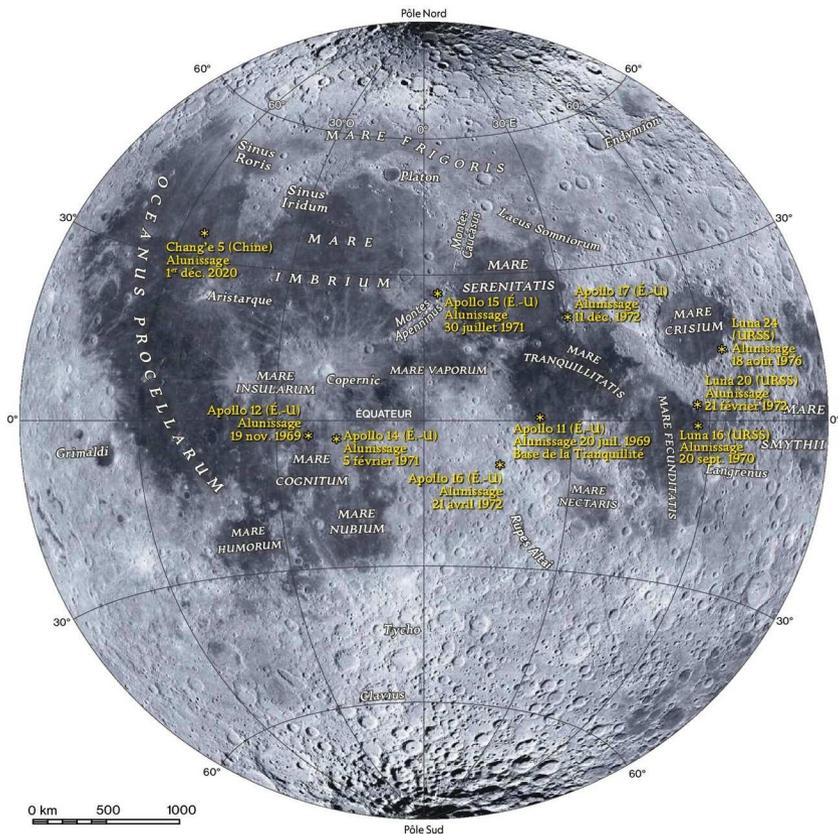
Le 21 juillet 1969, l'homme a marché sur la Lune pour la première fois. Cet astre fascinant, jusque-là inaccessible sauf en imagination, était néanmoins une voisine familière et réconfortante. Ce périple dans l'espace a renforcé le sentiment que la campagne de la Terre était la prochaine frontière de l'exploration et de la recherche scientifique. Douze hommes seulement ont posé le pied sur la Lune, le voyage des deux derniers remontant à cinquante et un ans. Les six missions lunaires habitées *Apollo* ont passé au total 300 heures sur le sol de notre satellite. Les astronautes ont rapporté quantité d'observations et d'échantillons, qui continuent de révéler des secrets concernant non seulement la Lune, mais aussi la Terre.

Depuis ces premières missions, l'homme a envoyé de nombreux engins spatiaux en orbite autour de la Lune et à sa surface. Ces robots explorateurs ont permis d'acquérir des connaissances incroyables sur notre satellite : découverte de glace d'eau, mesure de l'épaisseur de la croûte et cartographie des substances chimiques présentes à sa surface... Autant de jalons qui préparent le terrain pour que l'homme marche de nouveau sur la Lune. Un retour imminent : le programme *Artemis* de la Nasa prévoit de mettre en orbite lunaire un vaisseau habité dès novembre 2024, avant de faire alunir un équipage probablement fin 2025.

Des célébrations lunaires annuelles aux traditions culturelles et à la mythologie, en passant par les œuvres d'art, la Lune exerce une grande influence sur notre vie et sur notre imagination. Dans un Système solaire qui regorge d'objets célestes, le satellite de la Terre ne ressemble à aucun autre. ■

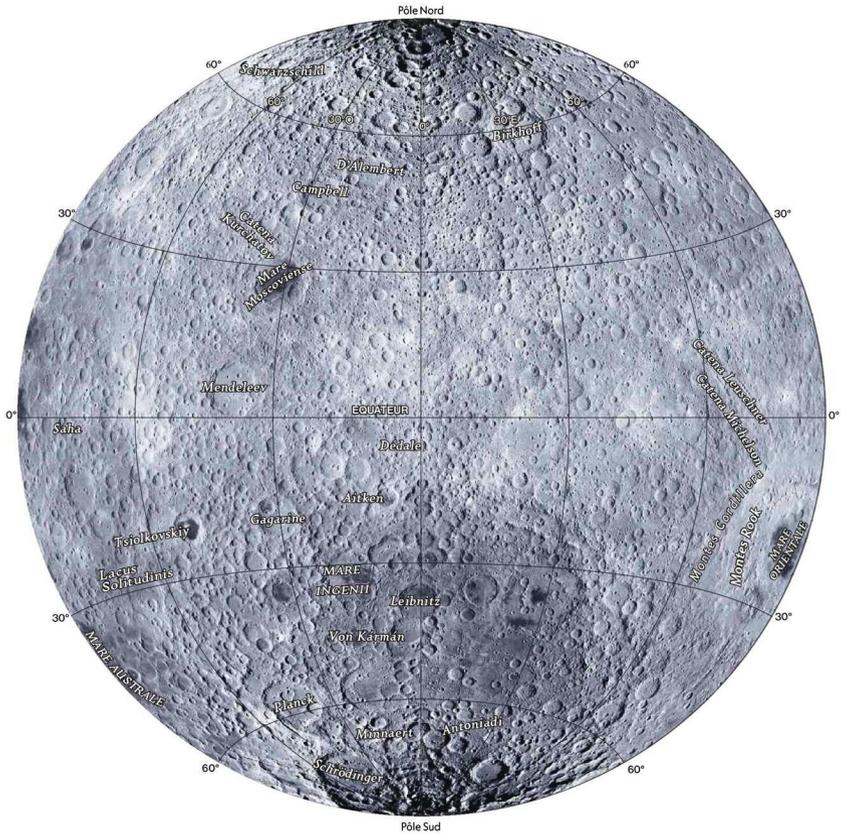
RECTO VERSO

La Lune tourne toujours la même face vers la Terre, c'est la face visible (ci-dessous). La face cachée (page de droite) est orientée vers l'extérieur. Chose curieuse, les deux hémisphères présentent des géologies différentes : la face visible abrite plus de « mers » sombres, qui sont des bassins d'impact remplis de lave séchée, tandis que la face cachée est constituée d'une croûte plus épaisse, recouverte de matériaux plus clairs et criblée de cratères. La face visible est la seule zone de la Lune à avoir été échantillonnée; elle a donc été beaucoup plus étudiée. Toutes



★ Sites d'alunissage des missions ayant ramené des échantillons sur Terre.

les missions qui ont rapporté du matériel lunaire – les six équipages *Apollo*, ainsi que les trois missions robotiques soviétiques et la dernière mission chinoise *Chang'e 5* – ont atterri de ce côté de l'astre. D'où l'impatience des chercheurs d'obtenir des échantillons de la face cachée afin d'étudier les différences entre les deux hémisphères. En 2019, la sonde chinoise *Chang'e 4* est devenue le premier et le seul engin spatial à atterrir sur celle-ci, en se posant sur le cratère Von Kármán, dans la région polaire méridionale. C'est peu dire qu'il reste encore beaucoup à explorer sur notre satellite.



CHAPITRE 1

RENDEZ-VOUS AVEC LA LUNE

Point de repère familier dans le ciel, la fidèle compagne de notre planète éclaire l'obscurité de la nuit. Depuis toujours, elle fascine les artistes, influence les cultures et les religions, interroge les scientifiques. Des premières représentations dessinées aux débuts du télescope, histoire d'une attraction.





Vieille de plusieurs siècles,
cette représentation
d'un croissant de Lune a
été réalisée dans le Chaco
Canyon, au Nouveau-
Mexique (États-Unis).

UNE ICÔNE UNIVERSELLE

Le disque éclairé de la Lune parcourt le ciel en suivant un cycle – de la nouvelle lune (sombre) au croissant (partiellement éclairé), à la lune gibbeuse (en grande partie éclairée) puis à la pleine lune (entièrement éclairée), et ainsi de suite. Les sociétés humaines observent ce cycle lunaire depuis des dizaines de milliers d'années. Le relevé de ces rythmes a aussi permis de marquer le passage du temps.

Chaque cycle dure environ 29,5 jours, soit près d'un mois. Le mot « mois » est lui-même dérivé d'un terme indo-européen signifiant « lune ». Alors que notre calendrier grégorien est fondé sur le cycle solaire, le cycle lunaire détermine les événements importants de maintes cultures. De nombreuses fêtes chinoises sont ainsi célébrées en fonction de celui-ci (comme la fête de la mi-automne, qui marque la pleine lune la plus brillante de l'année). Les calendriers juif et islamique obéissent également aux phases de la Lune.



Au Moyen Âge, les savants utilisaient des astrolabes comme celui-ci pour calculer la position des objets célestes.

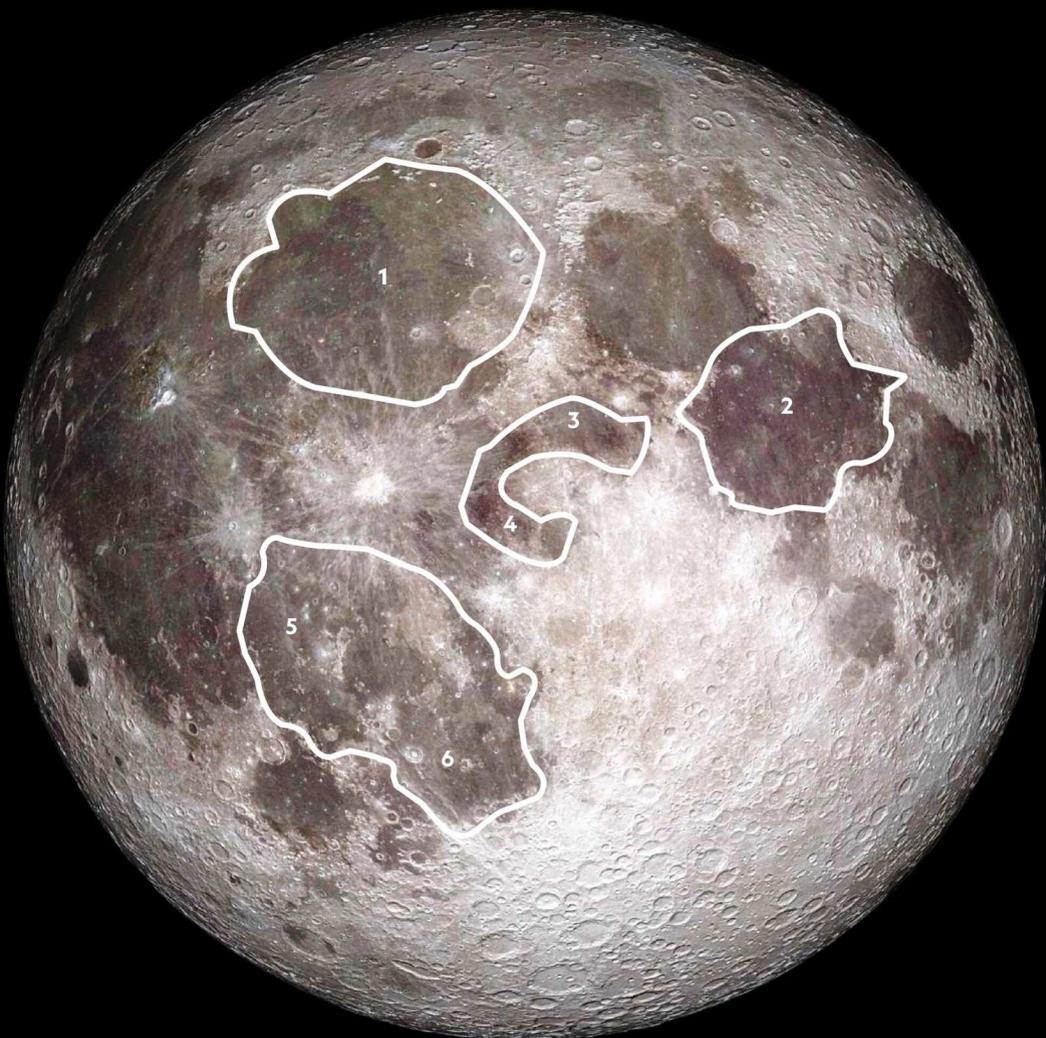
Plus qu'un simple indicateur de temps, cet astre influence l'humanité depuis des millénaires. Il est associé à des divinités telles que Séléné, fille des Titans grecs Hypérion et Théia, qui chaque nuit conduisait l'astre dans son char à travers le ciel. Les païens vénéraient également le satellite de la Terre et son influence sur les cycles de la nature. En Égypte et en Arabie, la Lune était perçue comme masculine, alors que dans beaucoup d'autres cultures, elle était féminine. Pour de nombreuses civilisations – comme le montre la mythologie coréenne – le Soleil et la Lune étaient souvent liés tels un frère et une sœur, ou compagnons d'une sorte ou d'une autre, et étaient presque toujours de sexe opposé.

Les humains ont aussi construit des structures – comme les cercles de pierre néolithiques en Écosse et les pyramides au Mexique – pour honorer ce brillant orbiteux croissant et décroissant dans le ciel nocturne. Par ailleurs, le croissant de lune et l'étoile ont alimenté la symbolique : ils sont associés, entre autres, à l'islam et figurent sur les drapeaux de plusieurs pays, dont ceux de la Turquie, de la Libye et du Pakistan.

Mais qu'en est-il de la façon dont les hommes interprètent ce qu'ils voient lorsqu'ils regardent la Lune ? La manière dont ils perçoivent l'astre remonte elle aussi à l'Antiquité. Si vous le contemplez la nuit, vous pourrez différencier des taches plus sombres et d'autres plus claires. Ces taches vous font-elles penser à quelque chose ? L'être humain a tendance à reconnaître des objets ou des êtres familiers dans des formes inconnues, et c'est ce que nous faisons depuis des siècles avec la Lune. Certaines cultures occidentales voient dans les zones sombres du disque lunaire les yeux, le nez et la bouche d'un personnage, qu'on appelle l'« Homme dans la Lune ». Les Chinois y distinguent la forme d'un lièvre. La vieille Angleterre reconnaissait un homme avec une lanterne. Les Maoris, en Nouvelle-Zélande, y décelaient une femme portant un fagot. Dans d'autres pays encore, comme l'Angola, les populations pensaient apercevoir un crapaud dans la géologie de notre satellite.



Gravée dans la roche
dans le nord-ouest de
la République tchèque,
cette Lune stylisée
date de 1500 av. J.-C.



Certains voient un visage dans les plaines de lave de la Lune.
Mare Imbrium (1) représenterait un œil, *Mare Tranquillitatis* (2),
l'autre œil, *Mare Vaporum* et *Sinus Medii* (3-4) formeraient le nez,
Mare Cognitum et *Mare Nubium* (5-6), la bouche.



Cette sculpture, exposée au musée Chiaramonti, au Vatican, représente la déesse de la Lune, appelée Séléné en grec ou Luna en latin. Elle date du III^e siècle après J.-C.

Au fur et à mesure que l'homme en apprenait davantage sur la Lune, certaines théories sur l'influence de l'astre ont vu le jour. De nombreuses personnes pensaient ainsi que les objets célestes affectaient la personnalité et la santé. Elles considéraient par exemple que la Lune apportait la fièvre, voire de brusques changements d'humeur (d'où le terme « lunatique »). Le folklore a aussi alimenté les croyances, telle l'histoire de l'homme qui se transforme en loup-garou lorsque la lumière de la pleine lune l'éclaire, et qui devient une menace pour la société. Les chercheurs tentent encore de savoir s'il existe une corrélation entre les comportements humains et animaux et les cycles lunaires. Cependant, nul scientifique ne l'ignore, corrélation n'est pas causalité. ■

Quand la Terre était le centre de l'Univers

Du temps de Ptolémée, on pensait que le Soleil, la Lune et les étoiles tournaient autour de la Terre immobile. Depuis, on sait que la Lune orbite autour de la Terre, qui orbite autour du Soleil avec sept autres planètes et leurs satellites, des astéroïdes et des comètes. Le Soleil est une des centaines de milliards d'étoiles de la Voie lactée, elle-même perdue au milieu de milliards d'autres galaxies.

LES DÉBUTS DE LA CARTOGRAPHIE LUNAIRE

En 1609, l'astronome anglais Thomas Harriot appuya son œil sur l'extrémité d'un tube doté d'une lentille convexe et d'un oculaire concave.

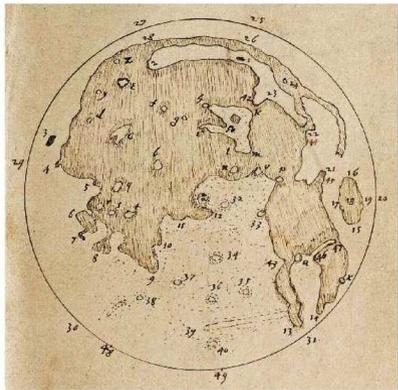
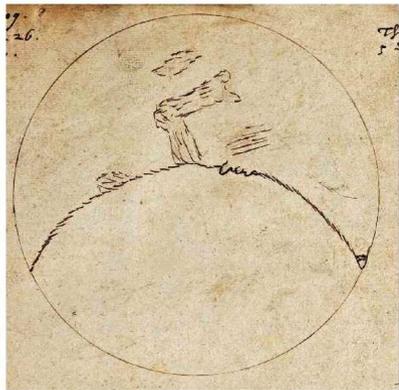
Cette lentille lui offrit un aperçu inédit de la Lune, révélant des détails qu'aucun humain n'avait jamais vus. L'astre en était au stade de cinq jours après la nouvelle lune. Harriot réalisa un croquis de ce qu'il apercevait du croissant, faisant ressortir la ligne abrupte où la lumière du Soleil pénètre dans les vallées entre les montagnes et les cratères. Il dessina les régions plus sombres des champs de lave gelée depuis longtemps, notamment celui connu aujourd'hui sous le nom de *Mare Crisium*. L'étude de la Lune a beaucoup évolué, mais tout a commencé avec cette première observation effectuée à l'aide d'une lunette astronomique.

Quelques mois plus tard, Galilée commençait son étude révolutionnaire du satellite. Avec son télescope rudimentaire, il observa les ombres qui se déplaçaient et changeaient à sa surface durant les 29,5 jours du cycle

lunaire. Il comprit que la Lune était couverte de montagnes, de cratères et de vallées – et non lisse comme les penseurs l'avaient toujours imaginé. Jusqu'à cette date, on croyait que tout ce qui existait dans le cosmos tournait autour de la Terre. Les études astronomiques de Galilée sur la Lune, les lunes de Jupiter et les phases de Vénus, ont contredit cette théorie.

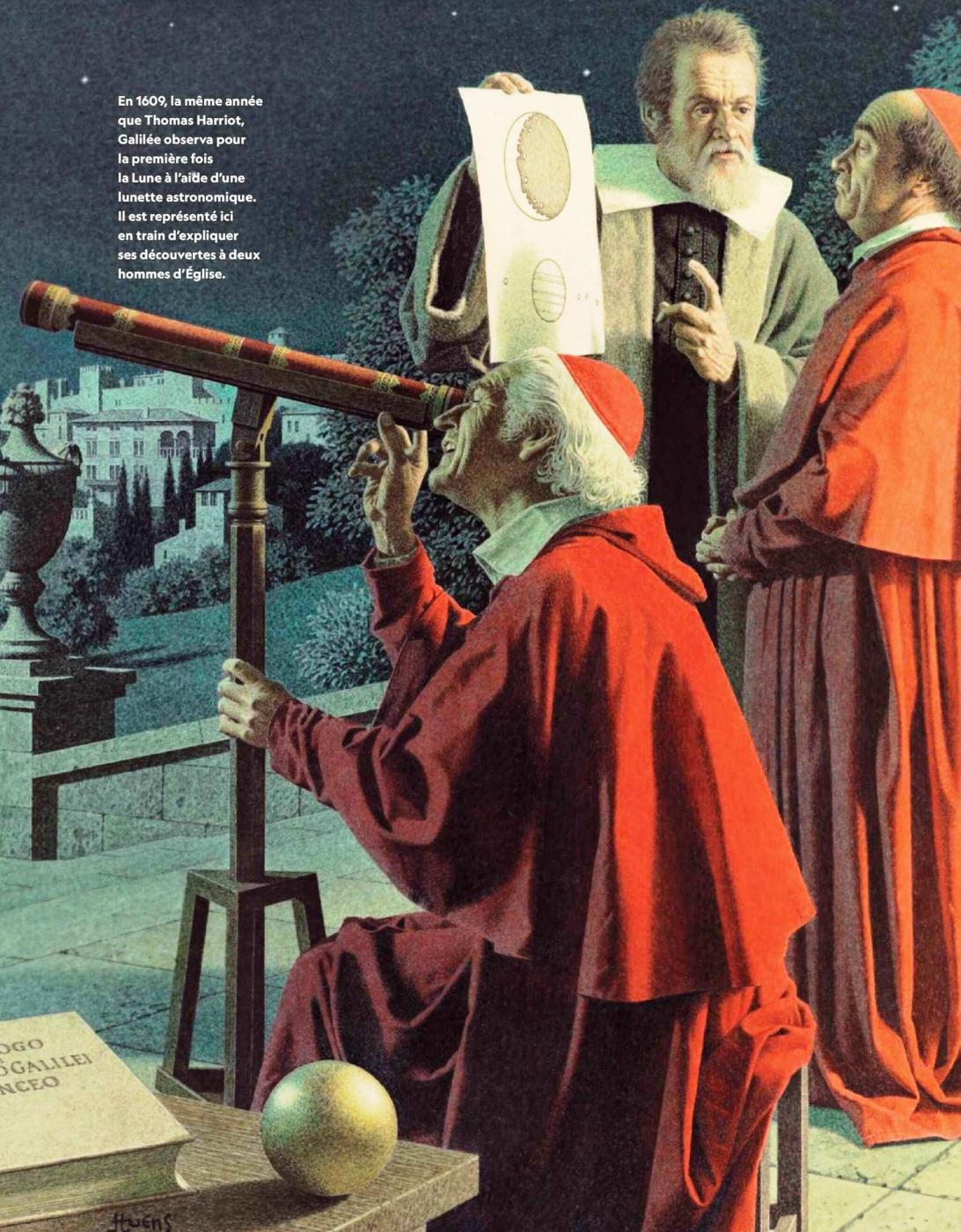
Les observateurs se sont succédé derrière les premiers télescopes pour esquisser des cartes de la surface lunaire. Afin d'établir cette géographie, ils choisirent des noms de membres de la royauté, de scientifiques, de régions et reliefs naturels de la Terre. Certains estimaient que les parties sombres visibles depuis notre planète étaient des étendues d'eau. Aujourd'hui, même si nous savons qu'il s'agit en fait de bassins d'impact remplis de lave solidifiée, nous les appelons toujours « *mare* » et « *oceanus* ».

Ces premières esquisses cartographiques manquaient d'exactitude. C'est à l'astronome polonais Johannes Hevelius que l'on doit des progrès décisifs en la matière.



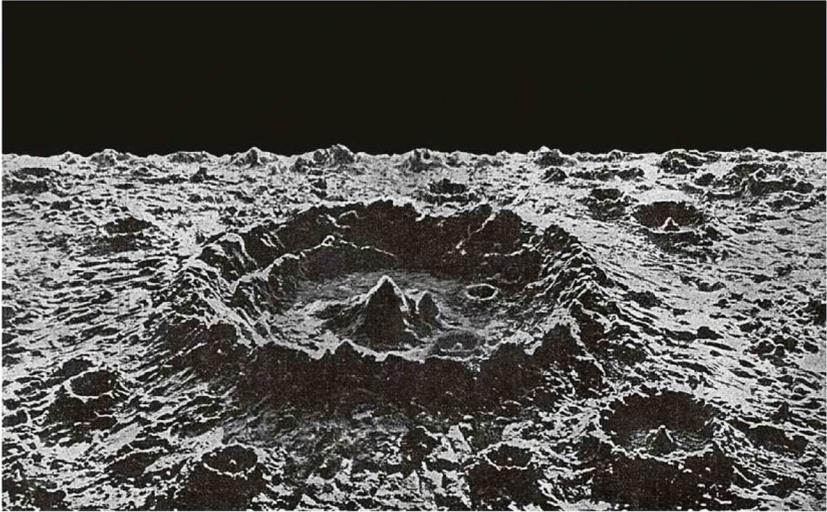
Thomas Harriot a réalisé le premier dessin connu de la Lune observée avec une lunette astronomique en juillet 1609 (à gauche). À mesure que ses appareils se perfectionnaient, il affina ses croquis et publia cette carte de la Lune en 1612 ou 1613 (à droite).

En 1609, la même année que Thomas Harriot, Galilée observa pour la première fois la Lune à l'aide d'une lunette astronomique. Il est représenté ici en train d'expliquer ses découvertes à deux hommes d'Église.





L'astronome et artiste français Étienne Léopold Trouvelot est l'auteur de cette gravure montrant la Lune traversant l'ombre de la Terre.



L'inventeur écossais James Nasmyth étudia la surface de la Lune et dessina ce qu'il voyait à travers le télescope qu'il avait lui-même construit. Il créa ensuite des modèles en plâtre, tel celui ci-dessus.

En 1647, il publia *Selenographia*, une compilation de dizaines de dessins de ses observations qui constitue le premier atlas de la Lune.

Les cartes d'Hevelius révélaient une autre particularité : elles semblaient montrer plus de 180 degrés de la Lune. Ce phénomène, que l'on appelle « libration », est dû à la relation entre la rotation de la Lune et son orbite légèrement elliptique autour de la Terre. De ce fait, la Lune semble osciller d'avant en arrière, révélant aux observateurs 58 % de sa surface au cours d'une orbite.

Certains des astronomes qui ont cartographié les reliefs de la Lune ont cru y déceler une activité géologique, comme des volcans en éruption. Mais nous savons aujourd'hui que la surface lunaire est depuis longtemps dépourvue de ce type de manifestations.

L'observation de la Lune n'a fait que s'améliorer avec le temps, en particulier avec l'introduction de la photographie longue exposition au milieu des années 1800. À ce jour, la cartographie de la surface de notre satellite reste une entreprise scientifique majeure. ■

Un personnage de science-fiction

À mesure que son étude scientifique s'est intensifiée, la fascination du public pour notre satellite s'est accrue. Au milieu du XIX^e siècle, Jules Verne écrit des récits fictifs sur l'exploration de la Lune. Au début du siècle suivant, le cinéaste Georges Méliès réalisa le premier film de science-fiction, *Le Voyage dans la Lune*. Dans ce court film muet, adapté du roman de Jules Verne *De la Terre à la Lune*, des explorateurs voyagent vers le sphéroïde, leur fusée propulsée par un canon. Une fois posés sur la Lune, ils explorent cet univers inconnu.

LE B.A.-BA DE NOTRE SATELLITE

La Lune a beau tenir une place majeure dans le ciel nocturne, les observateurs terrestres ne peuvent distinguer que ses caractéristiques les plus grossières. Son éclat offre une puissante source de lumière. Lorsqu'elle est au plus fort de son rayonnement, elle peut éclairer les nuits les plus sombres, ce qui favorise le camping et les balades au clair de lune, mais entrave l'observation des étoiles et des galaxies. Une idée fausse très répandue veut que l'astre émette sa propre lumière. Ce n'est évidemment pas le cas. La lueur que nous voyons est en fait un reflet de la lumière solaire qu'elle reçoit.

La Lune tourne autour de son axe (comme autour d'une ligne tracée entre son pôle Nord et son pôle Sud), réalisant une rotation complète sur elle-même en 27 jours environ. Dans le même laps de temps, elle effectue une orbite de 360 degrés autour de la Terre, tout comme cette dernière orbite autour du Soleil.

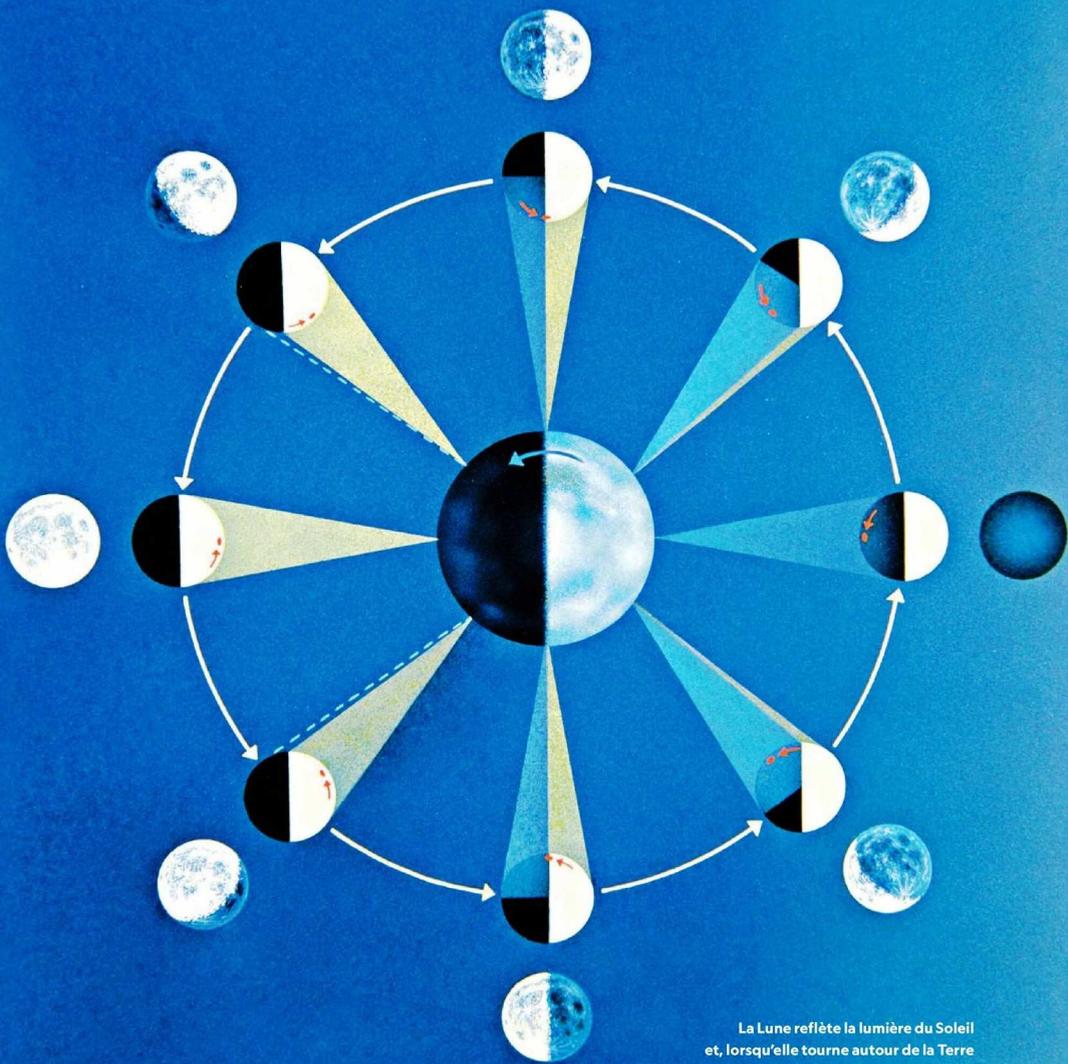
Les phases que nous observons sont dues à la position du Soleil par rapport au système Terre-Lune. Lors d'une pleine lune, la Terre se trouve entre le Soleil et la Lune, c'est pourquoi nous voyons un disque lunaire entièrement éclairé. Lors d'une nouvelle lune, la Lune se trouve entre la Terre et le Soleil.

Contrairement à la Terre, l'axe de rotation de la Lune est presque perpendiculaire à la direction de la lumière du Soleil, ce qui laisse certains cratères à sa surface en permanence dans l'ombre du rayonnement solaire. Dans ces régions sombres, la température est bien inférieure au point de congélation de l'eau – suffisamment basse pour que de la glace s'y trouve piégée par le froid depuis trois milliards d'années.

Ailleurs sur l'astre, la température fluctue en fonction de l'ensoleillement. Si une région est dans l'ombre, le froid peut y atteindre -173°C , tandis que les zones exposées à la lumière du Soleil peuvent grimper à 127°C .



La pleine lune se lève dans le ciel, face au Soleil couchant. La bande rosée s'étendant par temps clair sur l'horizon opposé au Soleil est connue sous le nom de ceinture de Vénus.



La Lune reflète la lumière du Soleil et, lorsqu'elle tourne autour de la Terre (au centre) et change de position par rapport à notre planète et au Soleil (qui serait situé à droite de cette image), nous la voyons passer par différentes phases éclairées.



Le diamètre de la Lune équivaut à environ 27 % de celui de la Terre et son volume représente peu ou prou 2 % de celui de la Terre.

En raison de l'attraction gravitationnelle mutuelle entre la Terre et la Lune, cette dernière est inexorablement liée à la Terre, le même côté éclairé, appelé face visible, faisant face à notre planète.

L'un des traits les plus caractéristiques de la Lune est sa surface grêlée. Les trous qui la criblent constituent autant d'indices sur son histoire : ce sont des cratères créés par des impacts de météorites ou d'autres corps célestes. Ces creux sont entourés d'immenses plaines constituées d'un matériau plus jeune – de la lave solidifiée. Étrangement, la face cachée de la Lune contient beaucoup moins de plaines de lave que sa face visible. La cause de ce phénomène reste un mystère, mais il

Qu'est-ce qu'une lune ?

Une lune est un satellite naturel en orbite autour d'une planète, et 6 des 8 planètes du Système solaire en ont. La Terre n'en compte qu'une, quand Mars en a 2 petites, Jupiter, 4 grandes et 75 petites et irrégulières. Saturne est agrémentée de 62 lunes. En ce qui concerne les géantes de glace, les scientifiques ont dénombré 27 lunes autour d'Uranus et 14 autour de Neptune.



Les astronautes d'*Apollo 8* ont pris cette vue alors qu'ils s'approchaient de l'orbite lunaire. Leur mission fut la première habitée à réussir à se mettre en orbite autour de la Lune.



pourrait être dû à l'épaisseur de la croûte lunaire, qui semble deux fois plus importante sur la face cachée et donc moins vulnérable aux collisions.

LA LUNE EN QUELQUES CHIFFRES

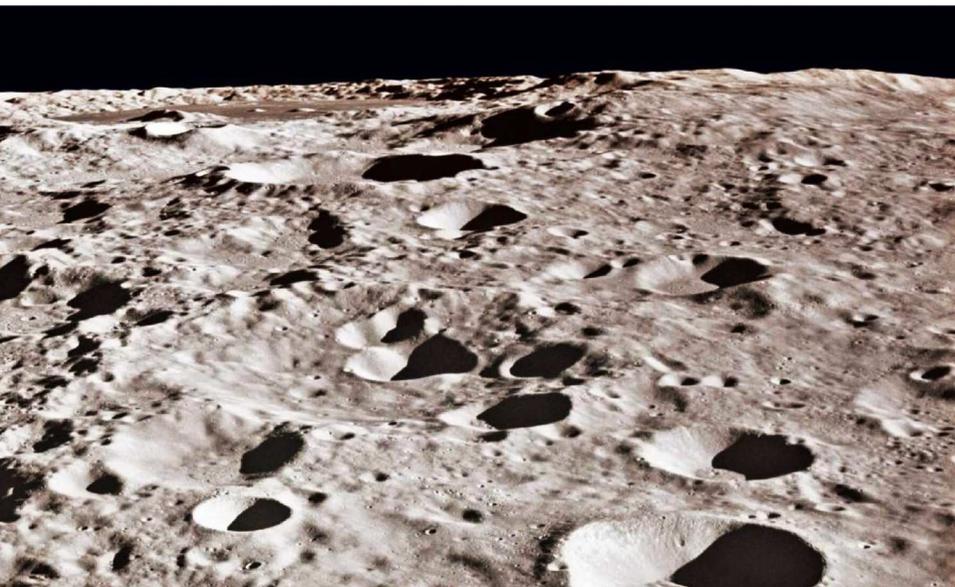
La Lune a un diamètre de 3 475 km, soit environ un quart de celui de la Terre. Mais elle ne représente que 1,2 % de la masse de notre planète et environ 2 % de son volume, ce qui indique qu'elle est composée de matière en moyenne moins dense que celle de la Terre.

L'orbite lunaire éloigne la Lune de la Terre d'une distance maximale de 407 000 km et la rapproche au plus près à 357 000 km. Lorsque notre satellite se trouve à cette distance, il se déplace légèrement plus vite que lorsqu'il est à son point le plus éloigné. Au début des années 1600, Johannes Kepler a déchiffré les lois fondamentales du mouvement des planètes, notamment les attributs des orbites en forme d'ellipse et la vitesse à laquelle un corps en orbite se déplace. Plus tard au cours

du même siècle, Isaac Newton a enrichi les travaux de Kepler de ses propres lois du mouvement et de la gravitation. Ces deux savants ont posé les fondements de la physique et des mathématiques modernes.

L'une des caractéristiques les plus remarquables de notre Système solaire tient au fait que toutes les planètes orbitent autour du Soleil sur un même plan à quelques degrés près. L'orbite de la Lune est cependant inclinée d'environ cinq degrés par rapport au plan orbital du Système solaire, ou plan de l'écliptique. Cette inclination est la raison pour laquelle l'astre ne s'aligne pas avec le Soleil à chaque nouvelle lune. Si c'était le cas, nous aurions une éclipse solaire tous les 29,5 jours.

L'orbite lunaire change constamment, s'éloignant peu à peu de la Terre. Chaque année, elle s'en écarte d'environ 3,8 cm tandis que la rotation de notre planète ralentit de quelques millisecondes par siècle. Il y a des milliards d'années, la Lune était plus proche de nous et la rotation de la Terre était plus rapide. ■



La face cachée de la Lune est criblée de cratères, cicatrices d'impacts de météorites.

Illusion d'optique

Lorsque le Soleil se couche, la pleine lune se lève à l'horizon opposé et provoque une illusion d'optique : elle apparaît plus grande à l'horizon que lorsqu'elle est au-dessus de nos têtes. Mais levez un doigt et tendez le bras. Comparez la taille de la Lune à l'horizon à celle de votre doigt. Puis, lorsqu'elle se trouve au-dessus de votre tête, tendez à nouveau le bras et comparez-la encore à votre doigt. Elle fait la même taille.



INFLUENCEUSE CÉLESTE

La masse de la Lune ne représente qu'environ 1% de celle de la Terre, mais elle n'en exerce pas moins une attraction sur notre planète. Grâce à Isaac Newton, nous savons que deux corps ayant une masse s'attirent sous l'effet de la loi de la gravité. C'est en partie ce qui maintient la Lune en orbite autour de notre planète. Et cette attraction gravitationnelle a un impact considérable sur la Terre. Par exemple, conjuguée à la gravité du Soleil, elle est responsable des marées des océans.

L'eau recouvre environ les trois-quarts de la surface de notre planète. Avec la rotation de cette dernière et l'orbite de la Lune, l'eau de la Terre est attirée vers la Lune sous l'effet de la force gravitationnelle, ce qui crée un léger renflement à la surface des océans. Ceux situés

du côté de la Terre qui fait face à la Lune ainsi que ceux situés du côté opposé à la Lune se gonflent, occasionnant ainsi les marées visibles sur le littoral.

La partie solide de la Terre est également attirée vers la Lune, mais dans une bien moindre mesure que l'eau, matériau souple qui se déplace facilement.

Les régions perpendiculaires à la ligne reliant les marées hautes connaissent quant à elles des marées basses. Sous l'effet de la rotation de la Terre et de l'orbite de la Lune, les lieux où les marées enflent changent, de sorte que, à des échelles différentes, notre planète connaît un peu partout des marées hautes et des marées basses, deux fois par jour en moyenne.

Les marées ne sont pas le seul phénomène par lequel nous faisons l'expérience directe de l'influence de la



Le port de Porthleven, au Royaume-Uni, à marée basse. En raison de l'attraction gravitationnelle de la Lune, les océans connaissent une marée basse et une marée haute jusqu'à deux fois par jour.

Lors d'une éclipse solaire,
la Lune passe entre la
Terre et le Soleil et bloque
partiellement la lumière
de ce dernier.





Au Centre spatial Kennedy, en Floride, des visiteurs observent une éclipse solaire partielle avec des lunettes de protection.



Pendant une éclipse lunaire totale, seule la lumière rouge du Soleil atteint la Lune.

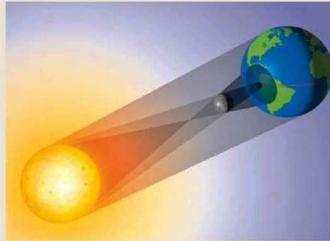
Lune. L'un des spectacles les plus incroyables qui se joue dans le ciel est la conséquence combinée de l'orbite de la Lune autour de la Terre, de l'inclinaison du plan orbital et de l'orbite de la Terre autour du Soleil. Lors d'une nouvelle lune, notre satellite passe entre la Terre et le Soleil. Si les astres s'alignent, ce qui est le cas deux à cinq

fois par an, l'ombre de la Lune peut tomber sur la Terre. Puis, une fois tous les 18 mois en moyenne, la géométrie céleste conduit à une éclipse solaire totale. Toute personne se trouvant sur cet étroit chemin d'ombre verra le disque solaire caché par la Lune. L'atmosphère extérieure du Soleil, faible et diffuse, est alors visible. Une éclipse solaire totale dure de quelques secondes à environ sept minutes et demie.

La géométrie joue un rôle dans un autre phénomène céleste, l'éclipse lunaire totale. Dans ce cas, ce n'est pas la Lune mais la Terre qui bloque la lumière du Soleil, et la Lune traverse l'ombre de la Terre. Ce faisant, l'astre devient rouge. Cela s'explique par le fait que lorsque la lumière du Soleil circule autour de la Terre, l'atmosphère épaisse de notre planète disperse la lumière bleue. La lumière rouge peut en revanche traverser l'atmosphère gazeuse et tomber sur la surface de la Lune, créant le spectacle connu sous le nom de Lune de sang. Les éclipses lunaires se produisent environ une fois par an et doivent coïncider avec une pleine lune. Elles sont visibles depuis une plus grande partie de la Terre que les éclipses solaires. Pour nous, elles offrent une occasion supplémentaire de constater l'influence de notre fidèle compagne. ■

Géométrie et éclipses solaires

Une éclipse solaire dépend entièrement de la géométrie des éléments concernés. Le Soleil, la Lune et la Terre doivent s'aligner, mais la position de chacun dans son orbite modifie également ce qui est visible depuis notre planète. L'orbite de la Lune autour de la Terre est elliptique. Par conséquent si, lors d'une éclipse solaire, notre satellite est à son point le plus éloigné de la Terre (et apparaît donc plus petit que celle-ci), un anneau de lumière solaire encerclera la Lune comme un anneau de feu. Il s'agit d'une éclipse solaire annulaire. Occasionnellement, en raison de la courbure de la Terre, une éclipse annulaire peut se



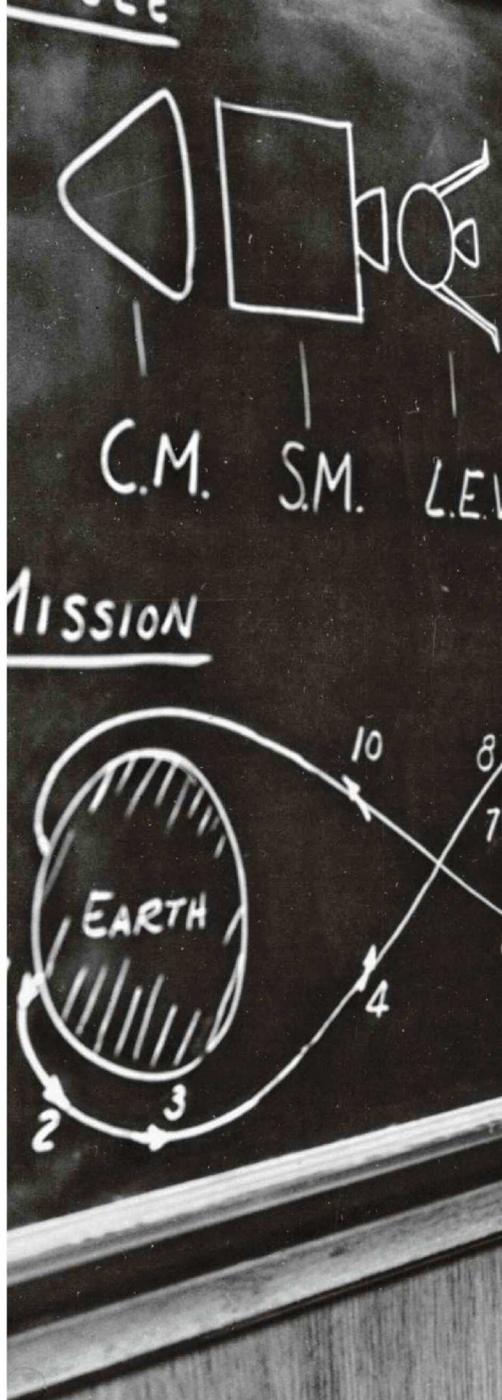
transformer en éclipse solaire totale (ou vice-versa). Il s'agit d'une éclipse solaire hybride. Dans un autre cas, la Lune peut passer au-dessus d'une partie seulement du disque solaire, semblant ainsi mordre sur le Soleil. On parlera alors d'une éclipse solaire partielle.

LA PORTE À CÔTÉ

La Lune, compagne céleste de la Terre, se trouve à nos portes. À environ 384 635 km de notre sol, ce qui correspond à la distance moyenne sur son orbite elliptique. C'est notre voisine la plus proche. Vénus, le second objet astronomique le plus près de la Terre se trouve à une distance 100 fois supérieure. La proximité de la Lune a fait de notre unique satellite naturel un objet particulièrement fascinant pour l'exploration - non seulement à l'aide de télescopes, mais aussi à l'aide de robots, avant de pouvoir y envoyer un être humain. On s'est même demandé si l'homme pourrait survivre sur la Lune lors de séjours prolongés. Qui plus est, cet astre pourrait aussi servir de terrain d'essai pour la technologie spatiale susceptible d'être utilisée un jour pour l'exploration humaine de Mars ou d'autres régions du Système solaire.

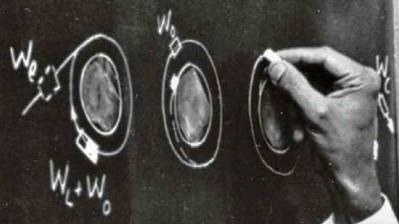
Après tout, les petits pas peuvent conduire à des bonds de géant. Pour toutes ces raisons, c'est la Lune qui a exercé le plus grand attrait pour les programmes spatiaux. Mais avant d'y poser le pied, on devait d'abord trouver le moyen d'aller dans l'espace. Il a fallu la menace d'une guerre pour pousser l'homme à s'envoler vers la terre ferme la plus proche. En 1957, l'Union soviétique lança *Sputnik 1*, le premier satellite artificiel, autour de la Terre, ce qui intensifia la course aux armements de la guerre froide. Les États-Unis répondirent quelques mois plus tard en lançant leur propre satellite, *Explorer 1*. La compétition pour envoyer un être humain sur la Lune venait de commencer. ■

L'ingénieur John C. Houbolt plaïda, lors du programme Apollo, pour le « rendez-vous en orbite lunaire », permettant de faire alunir un module habité depuis un vaisseau en orbite.

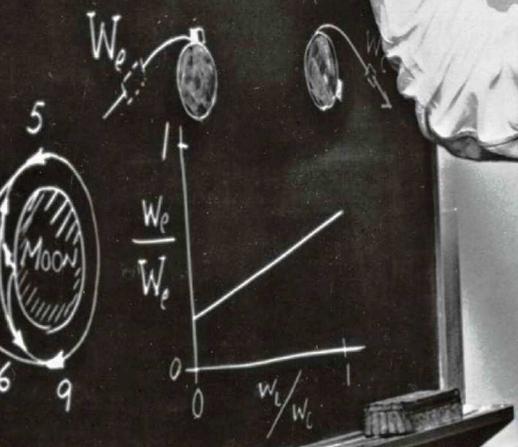


ESCAPE WEIGHTS

L.O.R.



DIRECT





CHAPITRE 2

UN PAS DE GÉANT POUR L'HUMANITÉ

Sur une période de trois ans et demi seulement sur les centaines de milliers d'années de l'histoire de l'humanité, notre Lune a accueilli des astronautes. Il y a cinquante-quatre ans, une mission a conduit pour la première fois des explorateurs à sa surface, rompant ainsi le superbe isolement de notre satellite.



L'astronaute Edwin « Buzz » Aldrin a pris ce « selfie spatial », avec la Terre en arrière-plan, lors de la mission Gemini 12 en 1966, près de trois ans avant qu'il ne pose le pied sur la Lune.

ATTRACTION LUNAIRE



Quatre ans après le satellite *Sputnik 1*, l'homme fit le tour de la Terre. Le cosmonaute soviétique Youri Gagarine est entré dans l'histoire le 12 avril 1961 en devenant le premier homme dans l'espace. Il est resté en orbite pendant 108 minutes, après avoir décollé du cosmodrome de Baïkonour au Kazakhstan, un site de lancement toujours en activité.

Le vol de Gagarine accéléra la politique spatiale des États-Unis. Le 5 mai suivant, Alan Shepard devint le premier astronaute américain à aller dans l'espace. Il fut lancé dans une capsule par une fusée *Redstone*. Bien qu'il n'ait pas été mis en orbite autour de la Terre, il voyagea dans l'espace à 186 km d'altitude et revint sain et sauf, après une mission de 15,5 minutes.

Plus tard ce même mois, le président John F. Kennedy, s'adressa au Congrès pour lui demander une augmentation des fonds alloués à l'exploration spatiale. « Je crois que cette nation devrait s'engager à atteindre l'objectif, avant la fin de cette décennie, de faire atterrir un homme sur la Lune et de le ramener sain et sauf sur Terre », déclara-t-il. Traduction de cette ambition, le projet *Mercury* fut le premier programme de la Nasa destiné à envoyer un Américain dans l'espace. Il avait trois objectifs principaux : placer un vaisseau spatial habité en orbite autour de la Terre, étudier les effets d'un séjour dans l'espace sur l'homme et ramener en toute sécurité le vaisseau et son pilote à la maison. Au cours de six vols spatiaux habités, dont quatre en orbite autour de notre planète, le projet *Mercury* donna aux États-Unis la



Ces deux capsules *Gemini* ont effectué le premier « rendez-vous » dans l'espace. Les engins ont voyagé ensemble, tournant l'un autour de l'autre, pendant trois orbites terrestres.



Cette photo prise depuis *Apollo 8* est l'une des plus emblématiques de l'ère *Apollo*. Elle montre la Terre s'élevant sur l'horizon lunaire.

Les astronautes
d'Apollo 12 Alan
L. Bean (à gauche)
et Charles Conrad,
cinq semaines avant
le lancement, au cours
d'une simulation
d'activité sur la Lune.





Le 12 septembre 1962, John F. Kennedy déclara : « Nous choisissons d'aller sur la Lune [...] non pas parce que c'est facile mais parce que c'est difficile. »

confiance nécessaire pour envoyer un homme sur la Lune. Lorsque ce programme prit fin en 1963, l'agence spatiale américaine lança officiellement le projet *Apollo*.

Mais la Nasa devait d'abord combler le fossé entre le fait de pouvoir orbiter autour de la Terre et celui de survivre à un voyage de plusieurs jours vers la Lune, en apesanteur. Tel fut l'objectif du programme *Gemini*.

Entre mars 1965 et novembre 1966, dix équipages de deux personnes effectuèrent des missions dans le cadre de ce programme. Au cours de ces vols, les astronautes accomplirent de nombreux exploits, tels que rester dans l'espace deux semaines, s'amarrer à un autre vaisseau et effectuer des sorties extravéhiculaires.

Les vols *Apollo* vers la Lune impliquaient un vaisseau spatial composé de trois éléments : le module de commande, contenant les quartiers d'habitation et le panneau de commande de vol ; le module de service, abritant les systèmes de propulsion et les systèmes de soutien du vaisseau – arrivés près de la Lune, ces deux éléments (appelés le CSM) devaient rester en orbite ; et le module lunaire, supposé se séparer des deux autres pour transporter des astronautes sur la Lune. Une partie de ce dernier module devait remonter ensuite en orbite et s'amarrer au CSM pour le retour sur Terre.

Les dernières années de la décennie furent consacrées à la réalisation de l'objectif du président Kennedy : faire atterrir un humain sur la Lune avant 1970. Les missions *Apollo*, cependant, ne furent pas toutes couronnées de succès. Elles commencèrent même par une tragédie. Le 27 janvier 1967, les astronautes Virgil « Gus » Grissom, Edward White et Roger Chaffee périrent dans l'incendie de leur module de commande au cours d'une procédure de test avant le lancement. La Nasa ne lança un autre vol *Apollo* habité – *Apollo 7* – que le 11 octobre 1968. Avant la fin de l'année, *Apollo 8* suivait pour un voyage autour de la Lune. Pour la première fois, l'homme voyait le satellite de près, découvrait sa face cachée, et assistait à son premier lever de Terre.

Un investissement colossal

Pour pouvoir poser un humain sur la Lune, l'agence spatiale américaine a mobilisé 400 000 ingénieurs, scientifiques et autres membres du personnel, ainsi que 20 000 entreprises et universités. Le programme *Apollo* a coûté quelque 24 milliards de dollars (l'équivalent de plus de 150 milliards de dollars actuels), et la Nasa s'est vu allouer environ 4 % du budget fédéral. À titre de comparaison, l'agence reçoit aujourd'hui environ 0,5 % de ce budget.



ON A MARCHÉ SUR LA LUNE

Le 20 juillet 1969, les quatre patins d'un vaisseau spatial construit par l'homme se sont doucement posés sur le sol lunaire. Quelque six heures plus tard, Neil Armstrong descendait prudemment une échelle de 3 m et foulait ce sol étranger. Une caméra de télévision attachée au module lunaire baptisé *Eagle* filma les quelques pas qu'il fit ensuite et les retransmit à ceux qui attendaient impatiemment sur Terre. La poudre grise sur le sol, la « poussière de lune », gardait l'empreinte des semelles de ses bottes à mesure qu'il avançait. Un Terrien marchait sur la Lune.



Le 16 juillet 1969, une fusée Saturn V s'est envolée du pas de tir et a envoyé les astronautes d'*Apollo 11* sur la Lune.

À 400 000 km de là, le Centre des vols spatiaux habités (aujourd'hui appelé Centre spatial Johnson), à Houston, au Texas, vibra sous les acclamations exubérantes et les soupirs de soulagement de ceux qui avaient planifié la mission. Ils avaient réussi. Ils avaient atteint l'objectif fixé par le président Kennedy huit ans auparavant devant le Congrès. Et, quelques jours plus tard, les ingénieurs de la Nasa ramenaient l'équipage d'*Apollo 11* – Neil Armstrong, Edwin « Buzz » Aldrin et Michael Collins – sain et sauf sur Terre.

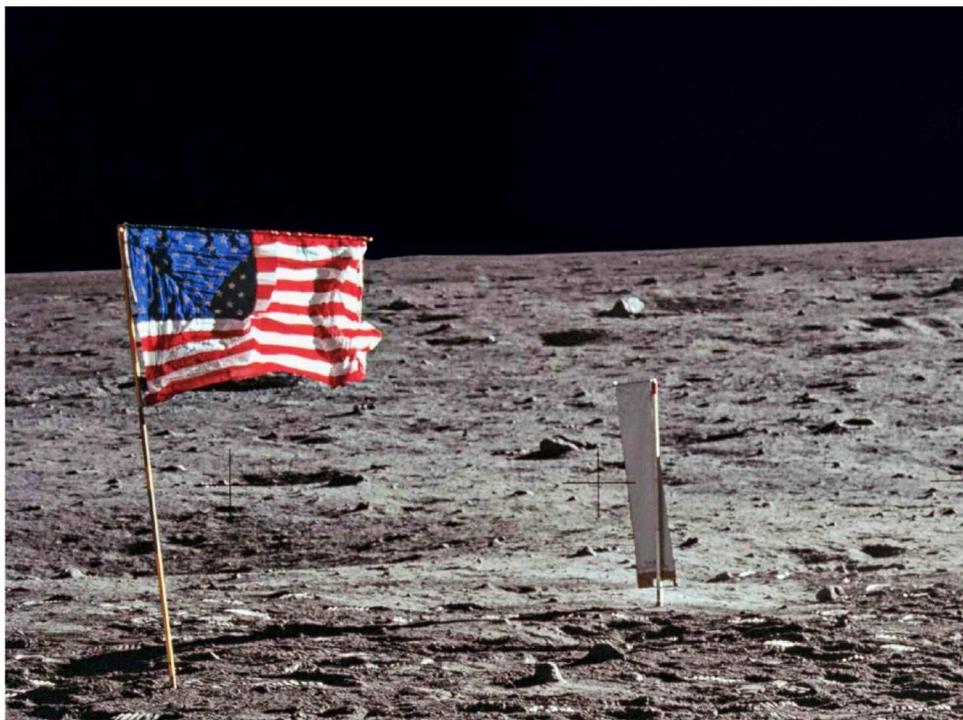
Quelques minutes après avoir posé le pied sur la Lune, Armstrong commença à prélever des échantillons de cette terre poudreuse à plusieurs endroits près de l'*Eagle*. Il stocka 1 kg de matériau dans un sac rangé dans la poche de sa combinaison spatiale. Si quelque chose tournait mal et que la mission devait s'achever prématurément, les astronautes d'*Apollo 11* auraient au moins un petit échantillon de la Lune à rapporter sur la Terre. La plus grande partie de cette poussière lunaire, connue sous le nom technique de régolithe, était grise et ressemblait à celle qu'on trouve sur Terre. Mais, au microscope, ce fut une autre histoire. Des billes de verre de quelques dixièmes de millimètre chacune révélèrent un passé d'activité volcanique ou d'impacts à haute énergie – ou les deux. Environ la moitié des échantillons ramenés par les astronautes d'*Apollo* était constituée de particules d'une taille inférieure à un centimètre. L'autre moitié se composait notamment de basalte (une roche volcanique à grain fin) et de fragments de roche cimentés ensemble (appelés brèches).

Environ 20 minutes après Armstrong, Aldrin descendit l'échelle avec précaution, devenant le deuxième homme à poser le pied sur la Lune. Un monde étranger, si complètement différent de notre propre planète enveloppée d'atmosphère. « Belle vue. Magnifique désolation », déclara-t-il.

Les deux hommes commencèrent à étudier la surface. En tant que premiers humains à appréhender ce monde, leur travail scientifique reposait essentiellement sur ce

L'astronaute d'Apollo 11
Edwin « Buzz » Aldrin
descend les neuf bar-
reaux de l'échelle d'atter-
rissage pour devenir le
deuxième homme ayant
marché sur la Lune.



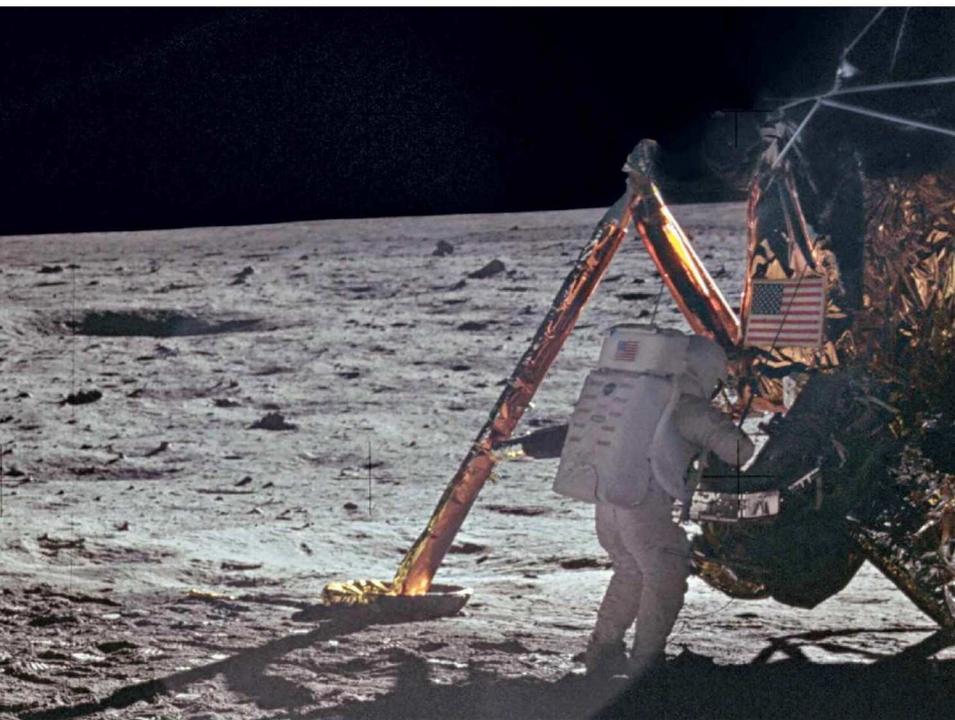


qu'ils pouvaient observer de leurs propres yeux et à l'aide de leurs caméras. Mais ils ont aussi mené une exploration plus technique. Ils ont par exemple recueilli des échantillons de particules chargées émises par le Soleil. Les chercheurs espéraient que ces résidus les éclaireraient sur la façon dont le Soleil et les planètes qui gravitent autour de lui s'étaient formés il y a des milliards d'années. Les deux astronautes ont aussi installé un réflecteur (pour mesurer la distance entre la Terre et la Lune) et déployé un sismomètre pour détecter les secousses sur l'astre, qu'elles proviennent de tremblements de lune, de volcans ou d'impacts énergétiques.

Mais leur tâche scientifique la plus importante a sans doute été la collecte d'échantillons de roches et de poussière lunaires. Les spécimens qu'ils ont rassemblés

sont analysés depuis des décennies et conservés sous clé derrière la porte d'une chambre forte du Centre spatial Johnson de la Nasa.

La mission *Apollo 11* fut le point d'orgue de l'exploration d'une nouvelle frontière. Afin de mieux étudier ce nouveau monde, tous les astronautes du programme *Apollo* furent formés à l'identification d'échantillons géologiques qu'ils devaient récolter et rapporter sur Terre pour des analyses plus approfondies. Du point de vue de la géopolitique mondiale, ce programme mit en valeur la capacité d'innovation technologique et l'ambition des États-Unis. Pour symboliser le succès de leur mission, Neil Armstrong et Edwin Aldrin plantèrent un drapeau américain de 1 x 1,5 m sur la surface lunaire près de leur atterrisseur *Eagle*. Ils avaient



Le commandant d'*Apollo 11* Neil Armstrong, près du drapeau américain et du module *Eagle*.

La bannière étoilée dans l'espace

Les astronautes de chacun des six alunissages *Apollo* ont planté un drapeau américain sur la surface de l'astre. Mais en l'absence d'une atmosphère aussi dense que celle de la Terre, les drapeaux étaient voués à pendre. Afin d'imiter l'apparence d'un drapeau flottant au vent, chacun d'entre eux a été assemblé de manière à inclure une barre transversale cousue dans un ourlet le long de sa partie supérieure, ce qui le maintenait à l'horizontale. La hampe du drapeau était télescopique et l'ensemble du kit d'assemblage ne pesait que 4,3 kg (sur Terre).





L'équipage d'*Apollo 11* était composé de Neil Armstrong, Michael Collins et Edwin « Buzz » Aldrin (de gauche à droite).

également apporté une plaque destinée à rester sur notre satellite après leur mission, sur laquelle on pouvait lire : « C'est ici que des hommes de la planète Terre ont posé pour la première fois le pied sur la Lune - juillet 1969 après J.-C. Nous sommes venus en paix pour toute l'humanité. » Les noms et les reproductions des signatures des membres de l'équipage d'*Apollo 11* et du président de l'époque, Richard Nixon, figuraient aussi sur cette plaque laissée sur la Lune pour témoigner de leur incroyable exploit.

Deux heures et demie après que Neil Armstrong eut commencé à descendre l'échelle d'*Eagle*, l'exploration de la surface lunaire par les astronautes s'achevait. Les deux hommes sont retournés dans le module lunaire, ont dormi quelques heures, puis ont décollé pour entamer le voyage de retour vers la Terre. Quatre heures plus tard, ils rejoignaient leur camarade Collins dans le module de commande. ■

Les pionniers

Le commandant de la mission Neil Armstrong (1930-2012) était aviateur naval avant de rejoindre l'agence spatiale américaine en 1952. Pendant les 17 années suivantes, il fut ingénieur, astronaute, pilote et administrateur de l'agence spatiale. Pilote du module de commande, Michael Collins (né en 1930), diplômé de West Point en 1952, a été pilote de chasse avant de rejoindre la Nasa en 1963. Le pilote du module lunaire Edwin « Buzz » Aldrin (né en 1930), diplômé de West Point en 1951, a combattu en Corée et a obtenu son doctorat en astronautique au Mit avant de rejoindre la Nasa en 1963.

Après avoir achevé sa mission historique sur la Lune, le module de commande Apollo 11 a améri sans encombre dans l'océan Pacifique.



EXPLORATIONS EN APESANTEUR

La gravité de la Lune n'est qu'un sixième environ de celle de la Terre. À sa surface, les astronautes sont donc confrontés à une attraction beaucoup moins forte, ce qui leur permet de faire des sauts beaucoup plus hauts et plus longs, et d'alléger leur équipement. Les hommes d'*Apollo* ont trouvé ardu de marcher ensemble au même rythme sur la surface lunaire, et ils ont souvent dû sautiller et faire des pas de côté. Ils ont également eu leur part de culbutes, garder son équilibre s'avérant être un défi.

Autres difficultés de taille : travailler et utiliser le matériel dans des conditions de gravité réduite. Les astronautes se sont exercés à certaines tâches sur Terre, comme installer des instruments scientifiques ou déplier le drapeau américain. Ils se sont entraînés dans le simulateur de flottabilité neutre (qui consistait essentiellement en une grande piscine d'eau), au Centre de vol spatial Marshall de la Nasa.

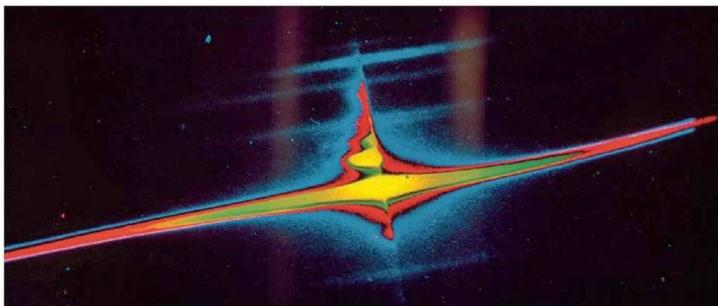
Par ailleurs, la Lune étant quasi dépourvue d'atmosphère, les astronautes avaient besoin d'une combinaison spatiale pour survivre. Celles portées par l'équipage d'*Apollo* étaient pressurisées, les protégeaient contre les variations extrêmes de température et fournissaient de l'oxygène pour des heures d'exploration.

Chacune des six missions *Apollo* sur le sol lunaire a été compliquée par l'omniprésence de la poussière lunaire. Au microscope, cette poudre a révélé qu'elle avait des bords dentelés, ce qui permettait à la poussière de s'accrocher à tout, y compris au tissu des combinaisons spatiales. Ces particules, qui sentent la poudre à canon et dont la texture est comparable à de la poudre de verre, suivaient les équipages dans leurs modules d'atterrissage et se dispersaient dans l'air. Elles se retrouvaient jusque dans le nez, la gorge et les yeux des astronautes et se collaient aux instruments. Trouver un moyen de minimiser cette contamination constituera un impératif pour les missions futures.

SURFER SUR LE SUCCÈS

Après *Apollo 11*, les équipages des cinq missions qui ont exploré la surface de la Lune se sont tous appuyés sur les découvertes des missions précédentes ; chaque fois pour une durée plus longue, et toujours plus loin de leur module d'atterrissage.

Apollo 12 décolla pour la Lune le 14 novembre 1969, et rentra au bercail le 24 novembre. Les astronautes Charles Conrad et Alan Bean effectuèrent des activités similaires à celles d'Armstrong et d'Aldrin sur un total

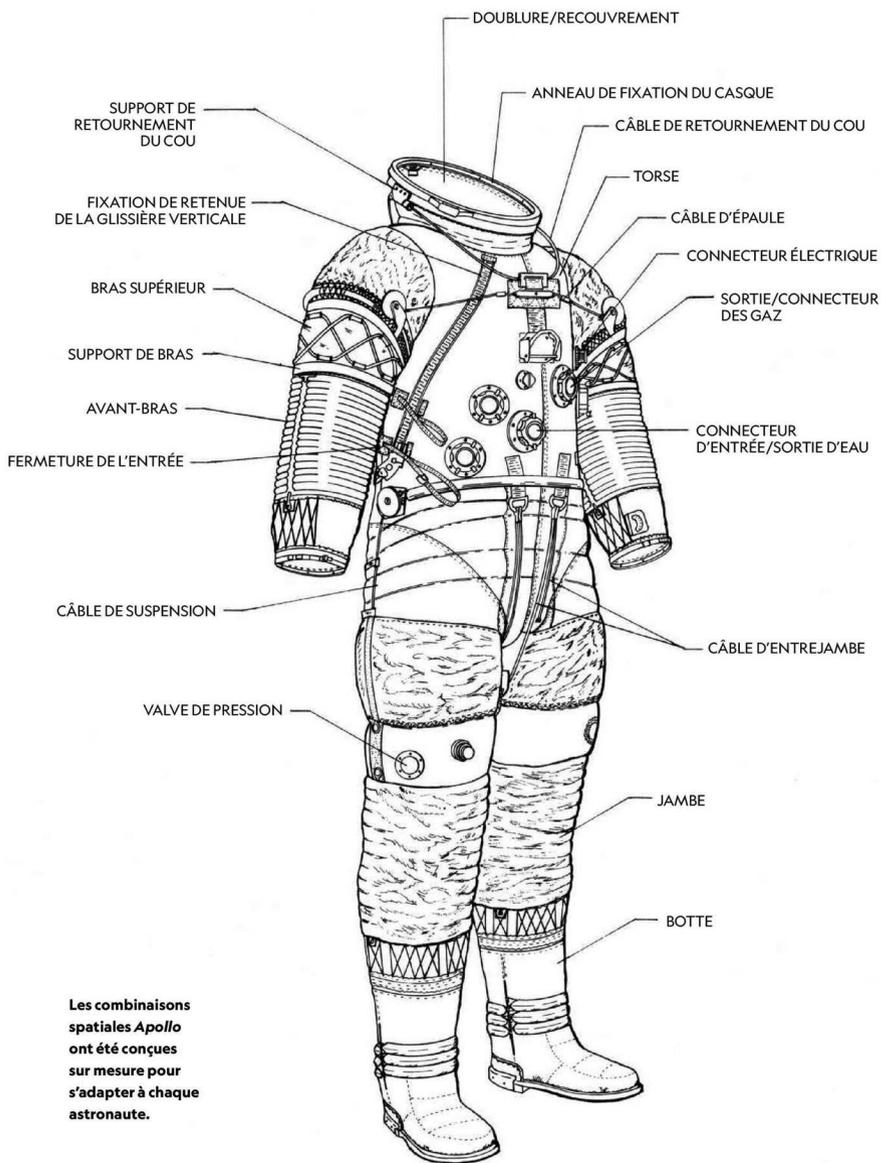


La mission *Apollo 16* était équipée d'une caméra spéciale pour capter la lumière ultraviolette. Tournée vers la Terre, elle a détecté une partie de l'atmosphère de notre planète et les gaz qui la composent.

Chacune des trois dernières missions *Apollo* comprenait un véhicule lunaire itinérant (LRV), qui augmentait le rayon d'exploration des astronautes.



UN COSTUME SUR MESURE



Les combinaisons spatiales *Apollo* ont été conçues sur mesure pour s'adapter à chaque astronaute.



Au cours d'une mission d'exploration extravéhiculaire, la poussière lunaire, collante et envahissante, a recouvert la combinaison de l'astronaute d'Apollo 17 Eugene Cernan.

de 7,5 heures réparties sur deux périodes d'exploration distinctes. La mission suivante, *Apollo 13*, connut un grave dysfonctionnement qui occasionna l'explosion du réservoir d'oxygène du module de service. Le vaisseau n'atterrit pas sur la Lune, mais le fait que les trois membres d'équipage soient rentrés sains et saufs a transformé cette mission en un succès phénoménal. Les quatre missions suivantes – *Apollo 14*, *15*, *16* et *17* – se déroulèrent sans problème.

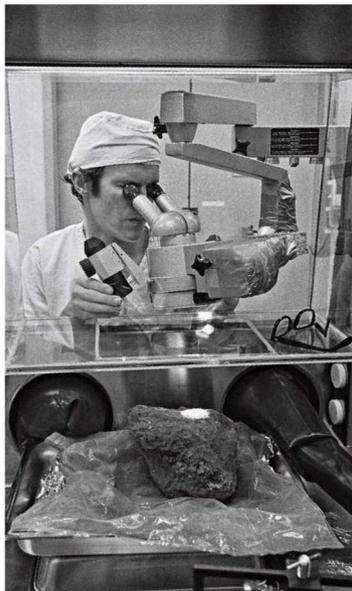
Apollo 14 permit de mener à bien les activités prévues par *Apollo 13*. Le module lunaire se posa là où la mission précédente avait prévu de le faire, et l'équipage rapporta 42 kg d'échantillons lunaires. Le commandant, Alan Shepard, est devenu le cinquième homme à marcher sur la Lune, près de dix ans après avoir été le premier Américain à aller dans l'espace. Les missions *Apollo 15*, *16* et *17* prévoyaient des expériences plus poussées sur des distances plus longues. Elles disposaient de rovers lunaires (LRV) qui ressemblaient à des buggies high-tech, conçus pour fonctionner en faible gravité, et qui pouvaient parcourir des kilomètres sur la surface poussiéreuse et rocheuse de l'astre. Chaque exploration pouvait ainsi récolter des échantillons sur des sites différents de celui de l'atterrisseur. Les astronautes d'*Apollo 16* ont passé 71 heures à la surface de notre satellite et l'ont explorée pendant 20,3 heures sur une distance de 26 km. ■

Armure spatiale

Chaque combinaison spatiale *Apollo* était composée d'une pièce principale (avec les gants, le casque et la visière solidement attachés à la combinaison), et l'astronaute y entrait par le dos. Ces tenues devaient être rigides pour résister à la pression exercée sur le corps, mais elles devaient aussi avoir des articulations spécialement conçues (aux genoux, hanches, chevilles, poignets, coudes et épaules) afin d'assurer une certaine mobilité. Ces combinaisons spatiales restaient toutefois volumineuses, encombrantes et assez inconfortables à porter.

LE GRAND LABORATOIRE

Avant la fin des années 1960, tout ce que nous savions de la Lune provenait d'instruments robotiques et de télescopes terrestres. Tout cela a changé à l'instant où l'homme y a posé le pied. Les astronautes ont alors pu décrire ce à quoi elle ressemblait de près – comment ils sentaient le sol sous leurs pieds, quel aspect avaient les roches et la poussière. Ils ont pu collecter des échantillons et les rapporter pour les faire analyser en détail. Et aussi utiliser sur place des caméras et d'autres instruments scientifiques. Les premières missions *Apollo* ont réalisé tout ce travail en l'espace de trois ans et demi.



Un chercheur d'un laboratoire de la Nasa examine au microscope un gros rocher rapporté par *Apollo 14*.

Par la suite, l'introduction du rover lunaire a permis aux astronautes de transporter davantage d'échantillons vers leur vaisseau spatial. Les équipages des trois missions finales – *Apollo 15, 16 et 17* – disposaient également d'une foreuse électrique pour extraire de la matière plus en profondeur dans le sol.

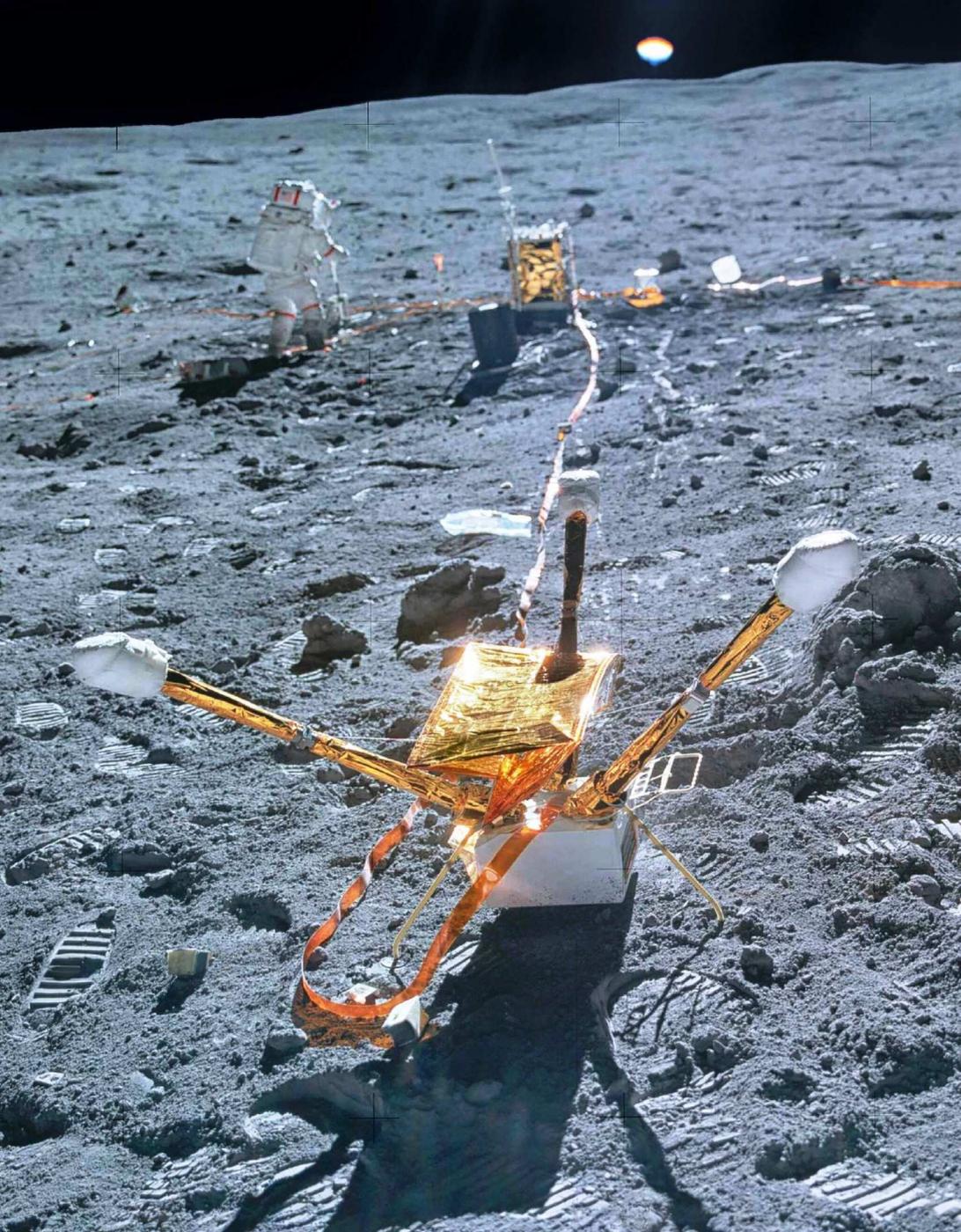
Ces explorateurs extraterrestres ont documenté chaque échantillon : ils le conservaient dans un sac portant un numéro d'identification et le photographiaient souvent dans son contexte lunaire afin de saisir la direction de la lumière du Soleil à ce moment-là. Les sacs étaient ensuite placés dans des boîtes de stockage pour le retour sur Terre. Une fois à la Nasa, les échantillons étaient traités et catalogués en vue d'une analyse scientifique. En 1979, le Centre spatial Johnson a ouvert le Lunar Sample Laboratory. C'est là que la plupart des fragments de notre satellite sont stockés depuis cette date.

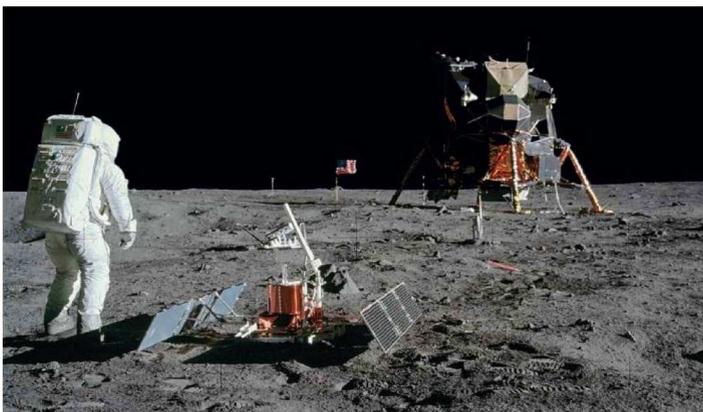
L'Union soviétique n'a pas fait atterrir d'êtres humains sur la surface lunaire, mais trois de ses missions robotiques (*Luna 16, 20 et 24*) ont collecté des éléments de sol. La mission chinoise *Chang'e 5* a été la dernière à rapporter des morceaux de Lune sur Terre, en décembre 2020. Elle a notamment récolté de la poussière du sol de l'océan des Tempêtes – une immense plaine basaltique qui n'avait jamais été échantillonnée auparavant.

Sur le plan scientifique, les échantillons lunaires ont été les pièces les plus importantes des missions d'exploration, mais des dizaines d'autres expériences ont été réalisées sur la Lune. Trois des six équipages d'*Apollo* ont laissé derrière eux des réflecteurs vers lesquels sont projetés des rayons laser émis par de grands observatoires terrestres. La surface des réflecteurs renvoie la lumière à sa source, ce qui permet aux scientifiques de mesurer le temps nécessaire à l'aller-retour de la lumière. Comme celle-ci voyage à une vitesse spécifique, la mesure indique aux chercheurs la distance qui sépare la Terre de son satellite. Grâce aux réflecteurs disposés sur les sites d'atterrissage des missions *Apollo 11, 14, et 15*, nous savons que l'orbite lunaire s'éloigne de la Terre de 3,8 cm par an.



L'astronaute d'Apollo 17 Harrison Schmitt utilise une pelle réglable pour prélever des échantillons lunaires - le trépied au premier plan sert comme référence de couleur et de taille.





L'équipage d'*Apollo 11* a apporté un détecteur sismique (au premier plan). Plus loin, on voit le réflecteur utilisé pour mesurer la distance entre la Lune et la Terre.

Quatre des six équipages *Apollo* qui se sont posés sur la Lune ont emporté des instruments de mesure du champ magnétique. Les données ont montré de grandes différences dans l'intensité du champ selon l'endroit où se trouvait la sonde. Cinq des équipages *Apollo* ont pratiqué des expériences sismiques, dont quatre se sont poursuivies jusqu'en septembre 1977. Lorsque des instruments sismiques situés à différents endroits détectaient la même secousse, les scientifiques pouvaient en apprendre davantage sur les entrailles de la Lune. Grâce à ces mesures, les chercheurs ont ainsi découvert que notre satellite possède une croûte externe, un manteau (qui s'étend de la croûte jusqu'à la couche en fusion autour du noyau) et un noyau interne solide et riche en fer – comme celui de la Terre.

Les chercheurs soumettent aujourd'hui toutes ces données à des techniques d'analyse toujours plus performantes. Mais cela ne concerne qu'une partie de la Lune – la face visible. La constitution du sol d'une grande partie de l'astre demeure encore inconnue. ■

Ce magnétomètre a été déployé par une mission *Apollo* pour mesurer l'intensité du champ magnétique.

In memoriam

Les astronautes d'*Apollo* ont laissé beaucoup d'objets derrière eux. Certains sont émouvants, telle la plaque déposée par l'équipage d'*Apollo 15* à la mémoire des 14 astronautes de la Nasa et cosmonautes de l'URSS décédés dans le cadre des missions spatiales entre 1966 et 1971. Dans un autre registre, pour faire de la place pour les échantillons, l'équipage d'*Apollo 11* a abandonné une caméra, des dispositifs de collecte d'urine, une pelle, et même un sac à vomir.



LES DERNIERS AVANT LA RELÈVE

Le 7 décembre 1972, peu après minuit heure locale, *Apollo 17* a décollé du Centre spatial Kennedy. Dans l'après-midi du 11 décembre, les astronautes américains Eugene Cernan et Harrison Schmitt se posaient sans encombre sur la Lune dans la vallée de Taurus-Littrow. Ce furent les deux derniers humains à fouler la poussière lunaire jusqu'à aujourd'hui.

Leur mission a été le point culminant du bond technologique américain dans le domaine spatial. Au cours des 75 heures qu'ils ont passées sur la Lune, les deux hommes ont consacré 22 heures à l'exploration. Cernan et Schmitt avaient pour objectif d'étudier les hauts plateaux de l'astre – des roches anciennes et cratérisées de couleur plus claire – ainsi que l'activité volcanique plus récente. Ils ont parcouru 30 km avec leur rover et recueilli 110 kg de matière lunaire, dont 741 échantillons de roches et de sols provenant de près de 24 sites distincts.

Le 14 décembre, peu avant minuit, les deux hommes s'apprentent à rentrer dans le vaisseau pour retourner dans le module de commande, lorsque Cernan déclare : « Alors que je fais le dernier pas de l'homme sur la Lune, je rentre à la maison pour un certain temps – pour pas trop longtemps, espérons-le – et j'aimerais simplement [dire] ce que je crois que l'histoire retiendra : le défi que l'Amérique a relevé aujourd'hui a forgé la destinée de l'homme de demain. Et, alors que nous quittons la Lune à Taurus-Littrow, nous partons comme nous sommes venus et, si Dieu le veut, comme nous reviendrons, avec paix et espoir pour toute l'humanité. » ■

Deux mois avant le décollage, Harrison Schmitt, Ronald Evans et Eugene Cernan (de gauche à droite) posent devant la fusée qui les emportera vers la Lune.





CHAPITRE 3

LES GRANDES DÉCOUVERTES

Nous en connaissons plus sur la Lune que sur tout autre élément de l'espace, excepté la Terre. Prélèvements d'échantillons de roches, mesures magnétiques et cartographie de la gravitation ont répondu à de nombreuses questions, mais ont aussi montré aux scientifiques qu'il leur reste beaucoup à découvrir.



Des robots semblables à celui-ci
sont en cours de conception pour
aider les futures missions spatiales
à localiser, extraire et analyser
les ressources dont dispose la Lune.



POUSSIÈRE EN CHAMBRE FORTE

Une grande partie de ce que nous savons sur la Lune provient des prélèvements de roches et de poussières que les astronautes d'Apollo ont rapportés. La récolte totale, qui s'élève à 382 kg, a été utilisée avec prudence et parcimonie par les scientifiques. La plupart des échantillons sont stockés au Centre spatial Johnson de la Nasa, à Houston. Ils sont gardés dans des chambres fortes, à l'intérieur d'une « salle blanche », une pièce où la concentration particulaire est maîtrisée, pour empêcher tout risque de contamination.

Les employés de la Nasa ont documenté chacun des spécimens, les pesant à leur arrivée et les photographiant sous toutes les coutures. Un processus de contrôle très strict est imposé à tout scientifique qui veut analyser ces échantillons, assorti de mesures de sécurité particulières. Une fois qu'un chercheur est autorisé à les étudier, il doit porter une combinaison spéciale pour salle blanche, et passer par une douche d'air pour s'assurer qu'il n'est pas porteur de contaminants avant d'entrer dans le laboratoire. Là, seuls quelques matériaux peuvent entrer en contact avec les morceaux de Lune. Le chercheur doit les manipuler avec des gants en téflon, dans une armoire transparente en acier inoxydable.

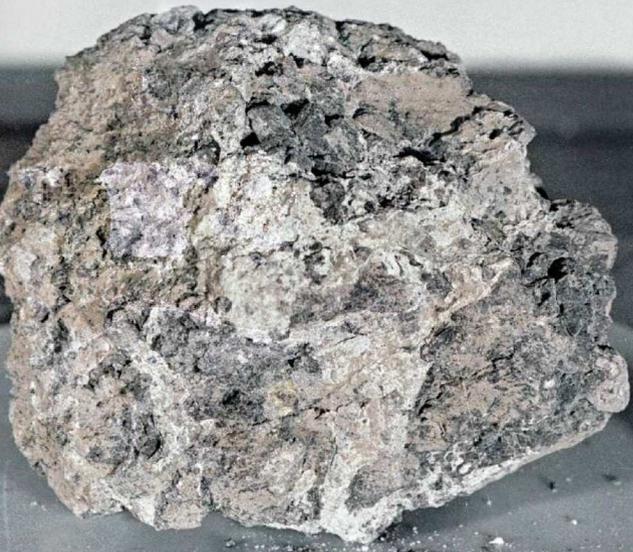
Si l'analyse qu'un scientifique prévoit d'effectuer est plus complexe et requiert de déplacer des fragments lunaires dans un autre laboratoire, les conservateurs de la Nasa découpent une fine tranche d'un échantillon. Chaque morceau qui s'en détache, y compris les poussières et débris, est pesé et documenté.

Certains échantillons sont souvent examinés, d'autres n'ont jamais été touchés. Au moins 50 % de chaque prélèvement original restent toujours stockés, et environ 80 % de l'ensemble d'entre eux n'ont pas été étudiés, dans l'attente de techniques d'analyse plus performantes. Les chercheurs espèrent qu'elles permettront de répondre aux questions sur la Lune encore non élucidées. ■





Les scientifiques ont photographié et répertorié tous les échantillons que les astronautes ont rapportés de la Lune.



UNE TRÈS VIEILLE DAME

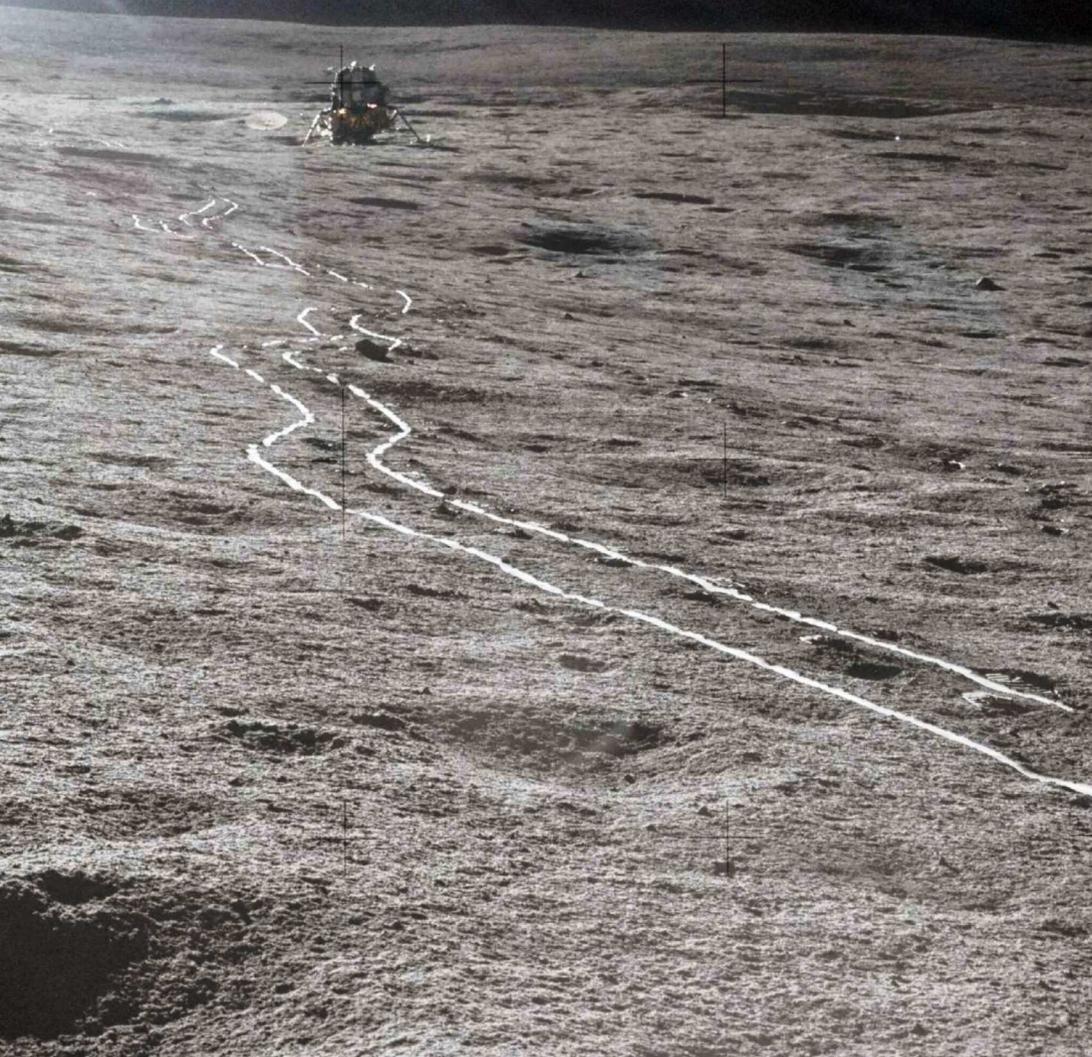
La surface de la Lune porte encore les cicatrices de la formation de notre Système solaire. Pour déterminer son âge, les chercheurs étudient les grands cratères d'impact créés par des corps célestes, comme les astéroïdes, qui se sont écrasés à sa surface, ainsi que les cratères plus petits et plus récents à l'intérieur des grands. Ces superpositions de cratères suggèrent une chronologie des événements. Pour affiner celle-ci, les scientifiques utilisent la géochimie afin de déterminer les éléments chimiques spécifiques présents sur la surface lunaire.

On distingue ces derniers les uns des autres par le nombre de protons qu'ils possèdent dans leur noyau. Pour calculer leur âge, les chercheurs s'appuient ensuite sur les isotopes radioactifs de leur noyau. Ces derniers ne sont pas chimiquement stables : ils peuvent se transformer spontanément en un autre isotope (appelé produit de désintégration). Or, on sait combien de temps il faut pour que la moitié d'une quantité donnée d'isotopes radioactifs opère cette transformation. En mesurant le ratio entre la quantité de l'isotope parent et celle de l'isotope de désintégration, les scientifiques peuvent ainsi calculer l'âge d'un matériau donné.

Pour déterminer quand la Lune s'est formée, les chercheurs se sont mis en quête de zircon, un minéral cristallisé dans le magma intérieur primitif de l'astre. « Le zircon est incroyablement robuste et résisterait à la plupart des désastres qui pourraient survenir sur la Lune, y compris les impacts de météorites », explique la géochimiste Mélanie Barboni. Elle et ses collègues en ont trouvé des morceaux dans deux échantillons rapportés par *Apollo 14*, et ont daté leur formation entre 3,97 et 4,33 milliards d'années. Par la suite, ils ont mesuré le ratio lutécium-hafnium qui permet d'établir à quelle date la croûte et le manteau de la Lune se sont séparés. Cela leur a permis d'établir que la Lune s'est formée il y a au moins 4,51 milliards d'années. ■

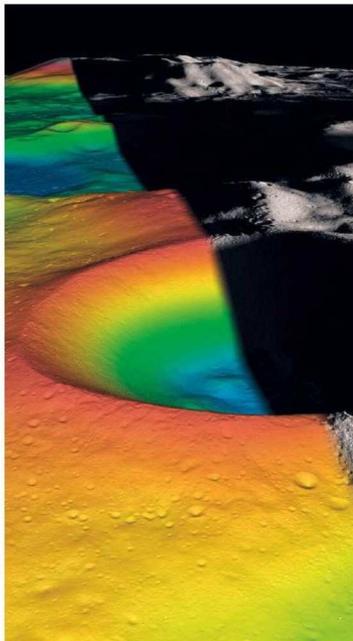


Cette photo de la trace laissée
dans le sol par le chariot
d'équipement de l'équipage
d'*Apollo 14* a été prise
depuis le module lunaire.



EAU DE LUNE

Des théories passionnantes sur l'existence d'eau lunaire ont été émises par les premiers observateurs de la Lune. Ils pensaient ainsi que sa surface était tapissée de lacs; nous savons aujourd'hui qu'il s'agit en réalité de bassins d'impact remplis de lave gelée. Les chercheurs se sont donc résignés à l'idée que notre satellite était totalement sec. Ils supposaient que la chaleur à haute énergie dégagée lors de sa formation avait provoqué l'évaporation de l'eau et d'autres substances volatiles.



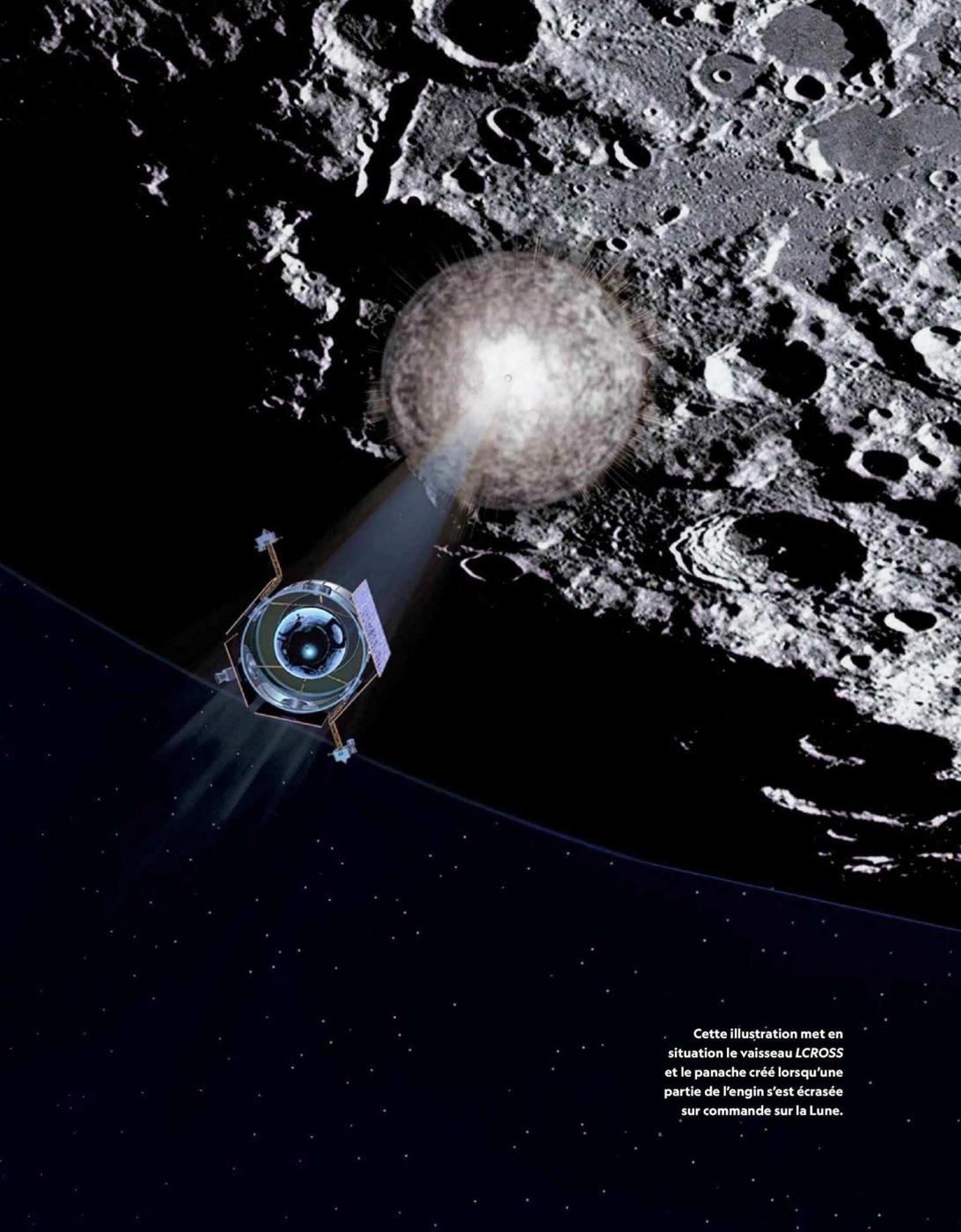
Les profondeurs du cratère Shackleton sont perpétuellement dans l'ombre. Il est probable qu'elles contiennent de la glace d'eau.

La surprise fut donc grande lorsque des recherches montrèrent, il y a une quinzaine d'années, que les roches volcaniques lunaires contenaient des traces d'eau. Depuis, d'autres travaux ont révélé sa présence, sous forme de glace dans certains cratères ou enfermée dans certaines roches. Mais celles-ci ne sont pas humides. Elles « sont sèches, extrêmement sèches, explique Katie Robinson, planétologue, qui étudie des échantillons rapportés par *Apollo*. Tellement sèches qu'il nous a fallu quarante-cinq ans pour découvrir qu'elles contenaient de l'eau ».

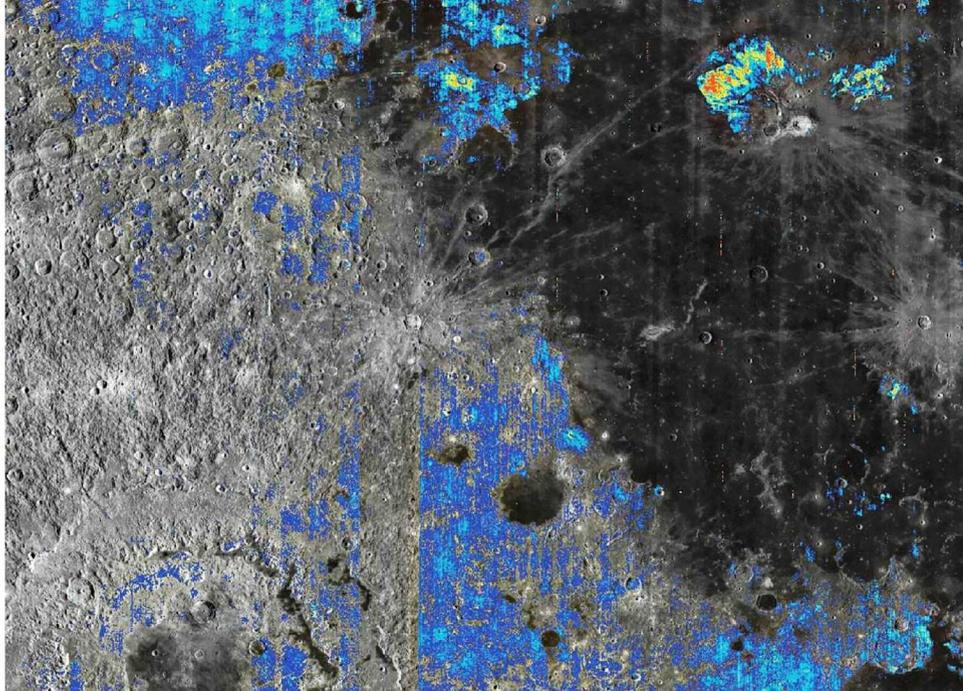
Mais cette eau est bien loin de celle que l'on trouve sur Terre. En réalité, elle se présente sous la forme de signatures aqueuses, des compositions isotopiques propres à l'eau. En 2008, une équipe de chercheurs a ainsi analysé des particules de verre dans des échantillons de basalte prélevés par les astronautes d'*Apollo 15* et *17*. Ces particules, qui sont des minéraux chauffés par le choc des éruptions volcaniques puis cristallisés, contenaient de l'eau datant de plus de 3 milliards d'années.

Dans le cadre de recherches connexes, d'autres minéraux spécifiques sont examinés, comme l'apatite, qui renferme des atomes d'hydrogène dans sa structure chimique. Les scientifiques ne recherchent pas de molécules d'eau de forme H_2O , mais plutôt différentes formes d'hydrogène. La plus courante possède un proton mais aucun neutron dans son noyau. Une autre forme, le deutérium, est connue sous le nom d'hydrogène lourd, car outre un proton positif, il possède un neutron non chargé dans son noyau.

Katie Robinson et ses collègues ont extrait l'hydrogène et le deutérium de leurs échantillons, puis mesuré le ratio entre leurs atomes. Ils ont pu ainsi déterminer la teneur en eau. Ce ratio peut aussi nous éclairer sur son origine, même si celle-ci n'a pas encore été confirmée avec exactitude. Certaines études suggèrent qu'elle provient de comètes qui se sont écrasées sur notre satellite; d'autres avancent que cette eau remonterait au moment de la formation de l'astre lors d'un impact géant entre la Terre et un autre corps céleste.



Cette illustration met en situation le vaisseau **LCROSS** et le panache créé lorsqu'une partie de l'engin s'est écrasée sur commande sur la Lune.



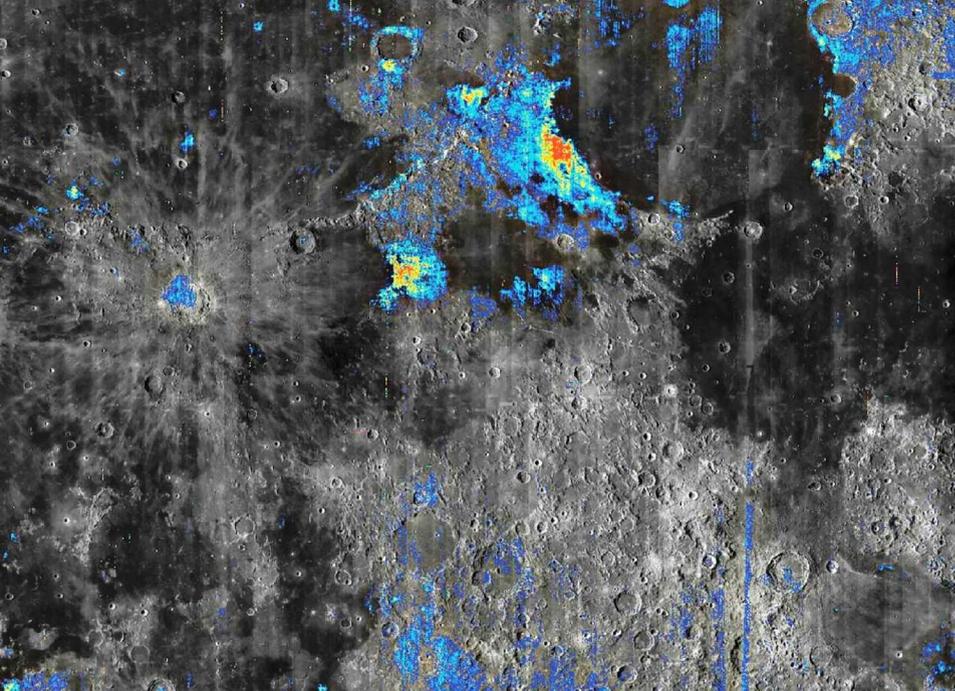
Si de nombreuses découvertes ont été faites à partir de l'analyse d'échantillons en provenance de la Lune, l'observation de sa surface a aussi livré quantité d'informations. Les premiers indices de la présence de glace de surface ont ainsi émergé en 1994, lors d'une mission en orbite de la sonde non habitée *Clementine*. Un instrument à bord du vaisseau spatial a envoyé des ondes radio vers la surface lunaire et des chercheurs basés sur la Terre ont attendu l'éventuel écho qui leur parviendrait. Si le signal rebondissait, cela pouvait indiquer l'existence de glace. Lorsqu'ils ont reçu de faibles signaux provenant de régions sombres près du pôle Sud lunaire, ils ont pensé que cela pouvait attester sa présence dans des cratères froids.

Quatre ans plus tard, la mission *Lunar Prospector* a découvert des indices d'une possible présence de glace aux pôles lunaires. À la fin de son séjour dans l'espace, le vaisseau spatial s'est écrasé sur commande dans une partie obscure d'un cratère. Les scientifiques espéraient

pouvoir détecter de la vapeur d'eau dans le panache provoqué par l'accident, mais ce ne fut pas le cas.

En 2009, dans le cadre de la mission *Lunar Crater Observation and Sensing Satellite* (LCROSS) – satellite d'observation et de détection des cratères lunaires – on envoya intentionnellement une partie de fusée vide percuter un cratère obscur afin d'en extraire des éléments. Le vaisseau spatial suivit, afin de traverser le panache de l'impact initial et de recueillir des données sur sa composition. Au bout de quatre minutes, il s'écrasa lui aussi sur la surface lunaire. Mais avant, ses instruments avaient détecté de l'eau.

En 2018, une équipe de chercheurs utilisa les données collectées par un instrument de la Nasa lors d'une mission indienne, *Chandrayaan-1*, pour étudier les régions polaires sous divers angles. Cette analyse permit d'identifier trois signatures différentes de glace d'eau qui prouvent sa présence à la surface de la Lune. La glace se cache dans les parties des cratères qui ne voient jamais

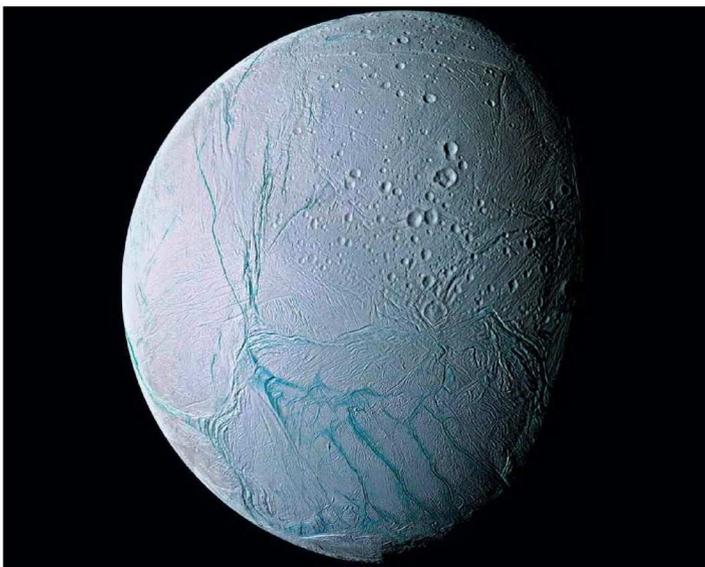


Sur cette carte de la Lune, les régions colorées indiquent la teneur en eau. Les zones où celle-ci est le plus abondante sont signalées en jaune et en rouge.

La fonte des comètes

Les comètes constituent peut-être la source d'eau la plus connue du Système solaire. Ce sont des corps glacés et gazeux qui passent la majeure partie de leur temps loin du Soleil. Mais si l'orbite d'une comète l'en rapproche, la chaleur fait fondre sa surface gelée. Lorsque les gaz gelés se réchauffent, ils enveloppent la comète. Des poussières et des gaz s'échappent, créant deux queues qui l'éloignent du Soleil. Quelques milliers de comètes ont été identifiées, mais il pourrait y en avoir jusqu'à mille milliards dans notre Système solaire.





Les scientifiques ont découvert plus de 100 panaches de vapeur d'eau sur Encelade, une lune de Saturne.

la lumière du jour en raison de l'orientation de l'orbite lunaire autour de la Terre et de l'orbite de notre planète autour du Soleil. Les températures dans ces cratères ne dépassant jamais -173°C , l'eau reste perpétuellement gelée. Selon les scientifiques, la glace se trouve dans les quelques millimètres supérieurs du sol, ce qui la rend relativement accessible pour de futures missions d'échantillonnage. Plus important encore, cette ressource pourrait être extraite et utilisée lorsque les humains retourneront sur la Lune.

Mais d'où vient cette eau et comment s'est-elle frayée un chemin jusqu'à ces cratères lunaires éternellement dans l'ombre ? Ces questions demeurent pour l'instant sans réponse. Les scientifiques savent depuis relativement peu de temps que de l'eau existe sur notre satellite. C'est peu dire qu'il reste encore beaucoup de recherches à mener et de passionnantes découvertes à réaliser pour les prochaines missions lunaires. ■

Les océans cachés de l'espace

La Terre est le seul astre de notre Système solaire à posséder des réserves d'eau liquide en surface. On trouve des lacs et des mers sur Titan, le plus grand satellite de Saturne, mais ils sont constitués de méthane et d'éthane liquides. Plusieurs lunes possèdent cependant des masses d'eau sous leur surface. Encelade, une lune de Saturne, rejette des panaches d'eau, ce qui signifie qu'il doit y avoir un réservoir souterrain alimentant ces geysers. Et Europe, une lune de Jupiter, est recouverte d'une croûte de glace cachant un vaste océan.

La sonde LCROSS, qui a détecté des traces d'eau sur la Lune, a été lancée dans l'espace avec la sonde Lunar Reconnaissance Orbiter dans ce module de protection.



NOTRE SATELLITE SOUS TOUTES LES COUTURES

La cartographie de la Lune est devenue une entreprise scientifique en 1647, lorsque l'astronome Johannes Hevelius publia le premier atlas dédié à celle-ci, *Selenographia*. Cette volonté de mieux connaître la géographie lunaire fut exacerbée, au milieu du ^{xx}^e siècle, par la course entre les États-Unis et l'Union soviétique pour la conquête de l'espace.

Les Terriens, rompus à l'observation du ciel nocturne, connaissaient déjà bien la face visible de la Lune. Mais, en 1959, le vaisseau spatial soviétique *Luna 3* prit la première photo de sa face cachée, dont l'aspect était étonnamment différent. Au lieu de la vision familière des mers sombres de lave refroidie, ce côté jusqu'alors inconnu de l'astre semblait essentiellement couvert de cratères d'impact de toutes tailles.

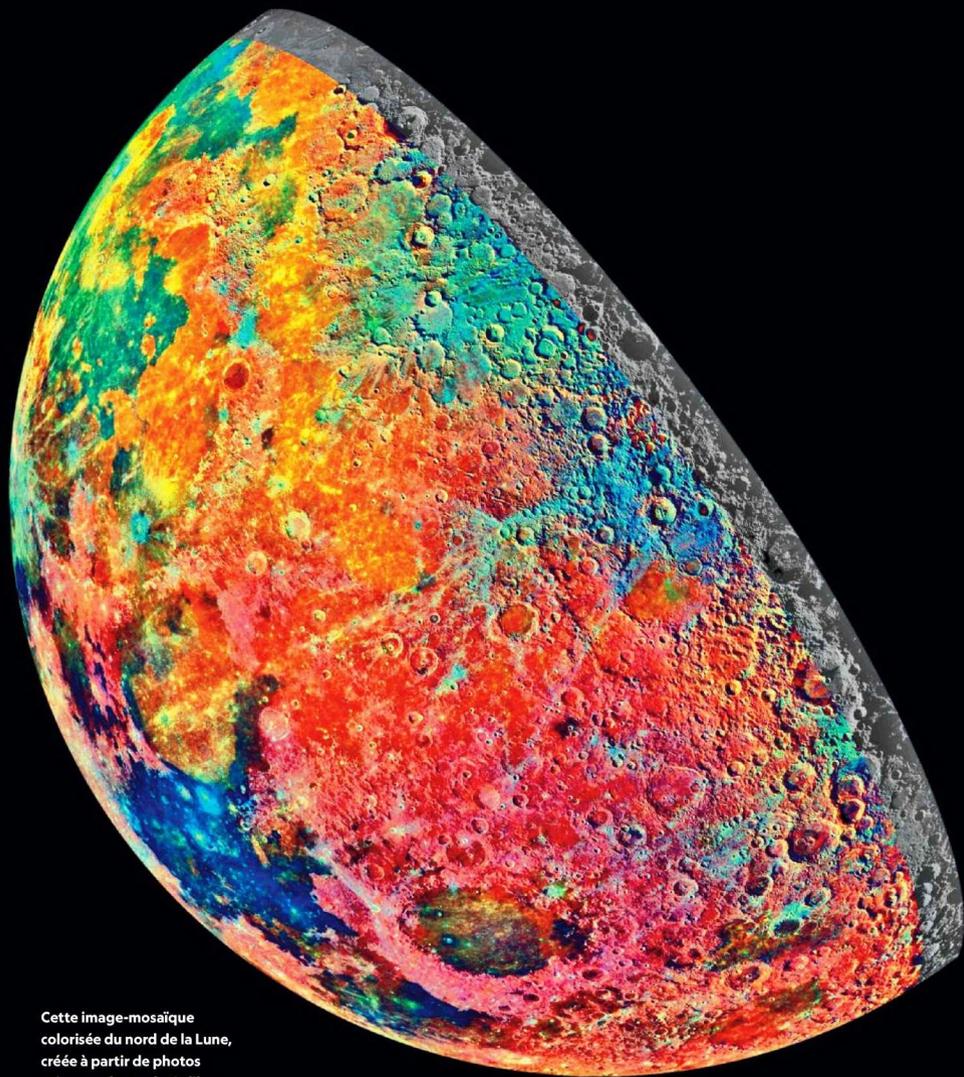
Au cours des soixante dernières années, nous avons pu examiner la Lune de plus près, ce qui a permis d'établir des cartes bien plus détaillées. Les planétologues

ont créé des cartes faites de mosaïques d'images de toute sa surface d'une extraordinaire résolution, parvenant à représenter quelques mètres par pixel dans certaines zones. Divers engins spatiaux ont fourni les données utilisées pour les générer, notamment *Chang'e 2* (Chine) et *Lunar Reconnaissance Orbiter* (États-Unis).

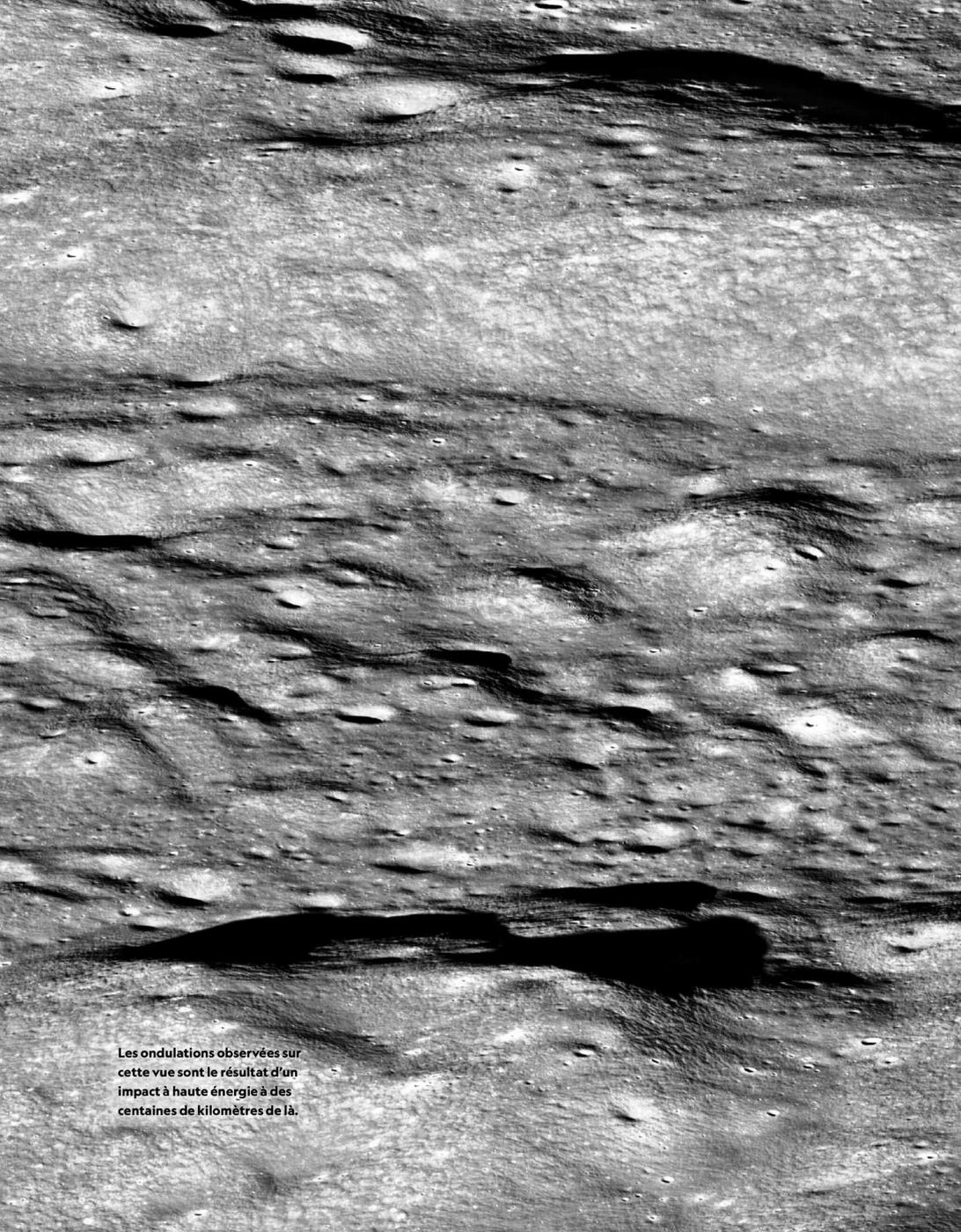
Le travail cartographique ne s'arrête pas à la seule surface lunaire. Au cours des deux dernières décennies, les chercheurs ont créé de nombreuses sortes de cartes. Une série géologique différencie ainsi des dizaines de types de matériaux dans les bassins, les mers et les grands cratères de la Lune. Une autre, globale, montre sa topographie – ses reliefs et ses dénivelés. D'autres encore détaillent les différents éléments chimiques et minéraux, comme le fer, le potassium, le thorium, le titane et l'olivine, et leur répartition sur la surface. Enfin, une carte de la croûte lunaire révèle l'épaisseur de la couche externe de la Lune à différents endroits.



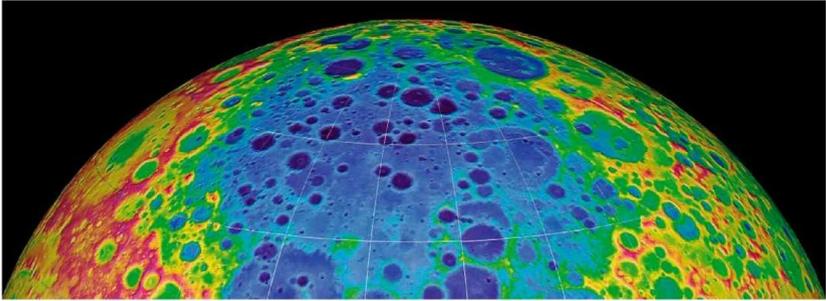
La sonde *Smart-1* de l'Agence spatiale européenne a cartographié les différents types de matériaux présents à la surface de la Lune entre septembre 2003 et septembre 2006.



Cette image-mosaïque colorisée du nord de la Lune, créée à partir de photos prises par la sonde *Galileo* en 1992, montre en rose foncé les hauts plateaux cratérisés et en bleu et orange des coulées de lave volcanique.



Les ondulations observées sur cette vue sont le résultat d'un impact à haute énergie d'un centaines de kilomètres de là.



Le bleu et le vert indiquent ici les régions basses - cratères et bassins -, tandis que le rouge désigne les régions élevées. Au centre, le bassin Pôle Sud-Aitken, l'une des plus grandes zones d'impact du Système solaire.

Chaque type de carte repose sur des données dont l'acquisition nécessite une technologie propre. Pour établir la carte topographique, par exemple, les chercheurs ont utilisé un instrument spécial à bord du *Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO)*. Le Lunar Orbiter Laser Altimeter (Lola) - altimètre laser en orbite lunaire - envoie un signal laser vers la Lune, qui se rétro-diffuse au contact de sa surface et renvoie une impulsion au Lola. Celle-ci est utilisée pour déterminer la distance entre le *LRO* et l'élément que le laser vient de frapper. À partir de cette mesure, les scientifiques peuvent calculer la hauteur des reliefs de l'astre.

Pour créer des cartes détaillant les minéraux propres à la Lune, les chercheurs ont notamment eu recours au Moon Mineralogy Mapper. Ce spectromètre imageur mesure les différentes longueurs d'onde de la lumière

réfléchi par la Lune. Ces longueurs d'onde se séparent en couleurs du spectre de la lumière visible et en lumière infrarouge, qui correspondent à différents minéraux. Le spectromètre de la sonde *Lunar Prospector* a ainsi détecté des rayons gamma et des neutrons dont l'énergie indique les éléments chimiques présents (chacun émet des signatures énergétiques uniques).

La carte de l'épaisseur de la croûte lunaire a été créée avec le concours de la mission *Grail 2011-12* de la Nasa (voir encadré p. 92). Deux engins spatiaux, *Ebb* et *Flow*, ont été lancés en orbite autour de la Lune, et ont mesuré les variations de sa force gravitationnelle afin de calculer sa densité apparente. Analysées avec les éléments topographiques du *LRO* et comparées aux informations sismiques des missions *Apollo*, ces données ont permis de déterminer l'épaisseur de la croûte lunaire. ■

Des briques de Lune

Les scientifiques réfléchissent aux façons d'optimiser les matériaux découverts sur la Lune, comme par exemple imprimer en 3D des structures à partir de poussière lunaire. Lors d'une simulation, des chercheurs ont utilisé des miroirs pour capter la lumière du Soleil et l'ont dirigée vers une imitation de poussière lunaire - des sédiments volcaniques provenant d'Arizona et un mélange de matériaux synthétiques -, ce qui l'a fait fondre. Cette matière s'est ensuite solidifiée en briques.



MYSTÈRES D'UNE NAISSANCE

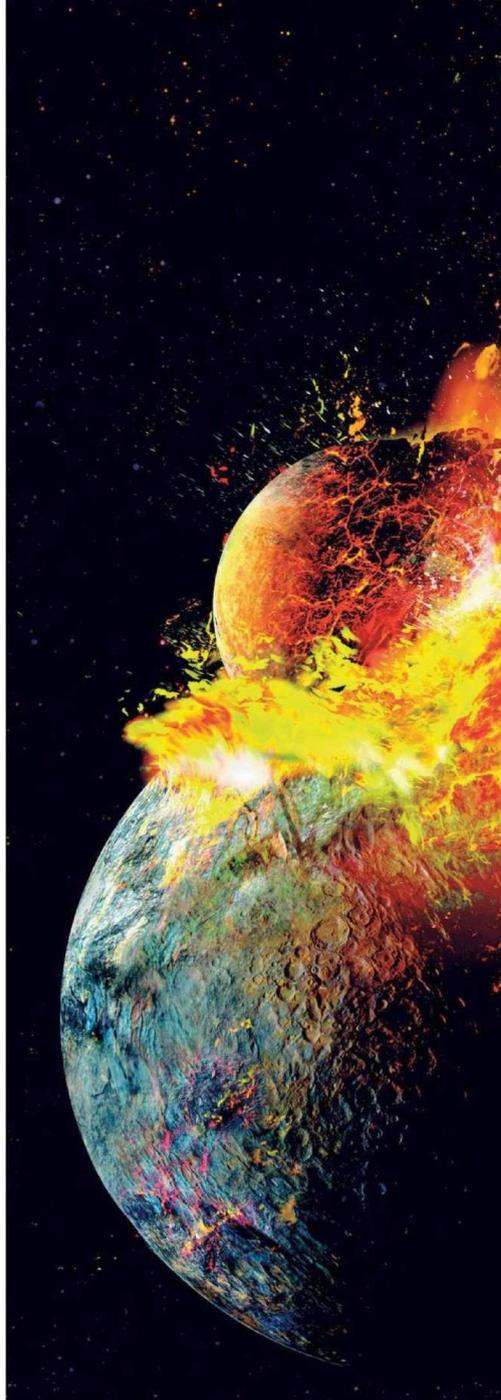


ême si nous avons résolu de nombreuses énigmes concernant la Lune, il reste encore beaucoup à découvrir.

Entre autres questions brûlantes et non élucidées : comment notre satellite s'est-il formé ? L'histoire de l'Univers aurait commencé il y a 13,8 milliards d'années par un big bang - une explosion qui a créé la matière, l'énergie, l'espace et le temps. Environ 9 milliards d'années plus tard, notre Système solaire a commencé à se former, sous l'aspect d'un nuage dense de gaz et de poussières interstellaires. La gravité et peut-être l'onde de choc d'une étoile en explosion, ou supernova, ont provoqué l'effondrement du nuage en un disque appelé nébuleuse solaire. C'est ainsi qu'est apparu le Soleil, il y a environ 4,5 milliards d'années.

À l'époque, celui-ci n'était encore qu'une protoétoile au centre d'un nuage de gaz et de poussières moléculaires en forme de disque tourbillonnant. Au fil du temps, ces matériaux moléculaires se sont accumulés dans des régions plus denses. Au fur et à mesure que le disque tournait sur lui-même et se réchauffait, la majeure partie de la nébuleuse se regroupait au centre et les atomes commençaient à s'entrechoquer pour fusionner en éléments plus lourds, émettant de l'énergie lors du processus de fusion. Le Soleil était né, représentant 99,8 % de la masse de l'ensemble du Système solaire. La matière plus éloignée forma des roches et des protoplanètes en orbite autour du Soleil naissant.

Le Système solaire primitif était chaotique et surpeuplé. Souvent, les petits corps solides interstellaires - astéroïdes rocheux, comètes glacées et objets plus gros - croisaient leurs orbites et se heurtaient les uns aux autres. Ces collisions avaient plusieurs conséquences pour ces corps célestes : soit ils se brisaient en petits morceaux, soit ils rebondissaient les uns contre les autres comme des boules de billard, soit ils fusionnaient en une entité plus grande.





Il y a des milliards d'années,
une protoplanète de la taille
de Mars, Théia, percuta
la Terre, et donna sans doute
naissance à la Lune.



Sous l'effet de la gravité, des débris rocheux se sont agglomérés et ont ramassé d'autres matériaux, formant la Lune.

De nombreux objets du Système solaire actuel témoignent de ces collisions. Les cratères sur certains corps célestes sont, par exemple, la conséquence de l'impact d'un projectile sur leur surface. De même, les astéroïdes en forme de cacahuète constituent les vestiges de mondes qui se sont heurtés puis ont fusionné. Un scénario en particulier pouvait causer d'énormes dégâts : celui d'un impacteur de taille importante, par exemple une protoplanète, s'écrasant sur un autre objet. Ce qui nous amène à la formation de la Terre et de la Lune.

Selon l'hypothèse de l'impact géant, les scientifiques pensent que, il y a environ 4,5 milliards d'années, soit 60 ou 70 millions d'années après la formation des premiers éléments rocheux du Système solaire, un objet de la taille de Mars (soit environ 10 % de la masse de la Terre) a percuté la proto-Terre. L'énergie impliquée dans cette collision était si énorme que le corps impacteur, connu sous le nom de Théïa, s'est pratiquement vaporisé, emportant avec lui une partie de la surface de cette Terre primitive. Les débris de la collision sont ensuite tombés en orbite autour de notre future planète.

Une centaine d'années plus tard – soit pas plus d'une seconde dans l'histoire de notre Système solaire – un autre corps céleste s'est formé à partir de ces débris éparpillés. Ce monde est devenu la lune de la Terre, pesant finalement environ 1 % de la masse de la Terre

et autour de 10 % de la masse de Théïa. Une partie des restes des débris produits par l'impact géant est retombée à la surface de notre planète, l'autre a emprunté d'autres trajectoires autour du Soleil. La Lune primitive est restée en orbite à proximité de la jeune Terre – on estime que la distance entre les deux corps était alors de trois à cinq fois le rayon de notre planète.

HYPOTHÈSES ET CONTRADICTIONS

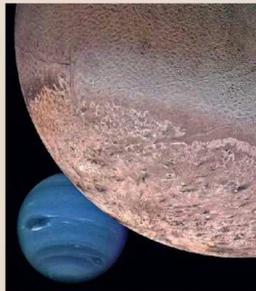
Les scientifiques en savent plus sur la Lune que sur tout autre objet céleste. Ce qui, paradoxalement, complique leurs travaux pour modéliser sa formation. Car toute reproduction que les théoriciens élaborent doit confirmer ce que nous savons déjà de cet astre.

Le modèle de l'impact géant, mis au point par l'astrophysicienne Robin Canup, répondait à ces critères lorsqu'elle l'a présenté pour la première fois au début du **xxi^e** siècle. Son modèle a permis d'affiner une hypothèse formulée dans les années 1970 et 1980. Ainsi, pendant des décennies, l'hypothèse de l'impact géant a été la théorie communément acceptée.

Mais après des recherches approfondies conduites sur des échantillons de roches lunaires, d'autres questions ont commencé à se poser. Dans toutes les versions de l'hypothèse de l'impact géant, la Lune se forme à partir de Théïa, l'impacteur qui a *(suite page 82)*

Origines non contrôlées

La formation de nombreuses lunes de notre Système solaire reste mystérieuse. Les chercheurs supposent que Triton, la lune glacée de Neptune, a été attirée par la force gravitationnelle de la planète. La couleur de sa surface laisse penser qu'elle viendrait de la ceinture de Kuiper, une région plus éloignée du Soleil. Un événement aurait perturbé ce système, occasionnant la fuite de Triton, qui aurait ensuite été capturée par la force d'attraction de Neptune. Du côté de Saturne, une autre étude émet l'hypothèse que plusieurs petites lunes se sont formées à la suite de collisions frontales avec d'autres lunes. Même les anneaux de la planète pourraient être les restes d'un satellite glacé saturnien.



Cette illustration
montre la Terre primitive
bombardée par une
pluie de corps célestes.







Représenté par une modélisation, l'impact géant entre Théia et la Terre crée une synestie de matière vaporisée en forme de donut, et la Lune s'y forme en périphérie.

(suite de la page 79) frappé la Terre primitive, et non à partir de notre planète elle-même. Mais les échantillons lunaires collectés lors des différentes missions *Apollo* racontent une autre histoire. Les scientifiques ont découvert l'existence d'éléments chimiques très similaires entre la Lune et la Terre - trop similaires, selon eux, pour avoir été créés par des corps distincts dans le Système solaire.

« Chaque corps planétaire - et les météorites qui en sont issues - possède une signature isotopique unique en fonction des éléments qui le composent », explique la planétologue Sarah Stewart. Les isotopes sont des atomes qui possèdent le même nombre de protons (qui définit l'élément) mais un nombre variable de neutrons. Les ratios entre les isotopes sont spécifiques à chaque corps du Système solaire, un peu comme les empreintes digitales pour les humains.

Stewart et ses collègues ont abordé la question de la formation de la Lune de manière un peu différente. Dans leur modélisation, ils sont partis d'un impact géant, dont l'énergie était si considérable qu'elle a non seulement vaporisé Théia, mais aussi partiellement la Terre. Le nuage de matière vaporisée - en forme de donut - provenant de la collision de Théia et de la proto-Terre, qu'on appelle synestie, aurait conduit à la formation de la Lune, résultat du mélange de matières de l'impacteur et de la proto-Terre. Cette théorie expliquerait les similitudes dans la composition de notre Lune et celle de la Terre.

Entre-temps, de nouvelles recherches ont brouillé un peu plus les pistes. Le géochimiste Nicolas Dauphas, de l'université de Chicago, a fait de nouvelles observations sur les météorites. On sait que celles-ci sont des vestiges des premiers éléments de matière qui se sont développés dans le Système solaire au cours des premiers



millions d'années. On pense que la Terre ne se serait formée que des dizaines de millions d'années après. Cependant, Dauphas a remarqué un chevauchement surprenant entre les isotopes trouvés dans certaines météorites et sur la Terre. Une hypothèse expliquant ces similitudes serait que la matière céleste ayant formé la Terre par accréation provienne depuis toujours d'impacteurs de composition similaire à Théia. La Terre et Théia auraient donc partagé des éléments identiques dès le commencement. Il serait ainsi possible que la Lune se soit formée directement à partir de Théia, sans qu'un mélange avec la Terre ne soit nécessaire pour expliquer la concordance de leurs isotopes.

Si la théorie de l'impact géant pour expliquer la formation de la Lune faisait consensus il y a une quinzaine d'années, les recherches les plus récentes ont ébranlé les certitudes des chercheurs. ■

Des théories à la pelle

La formation de la Lune est l'une des questions d'astrophysique les plus débattues. Elle a alimenté de nombreuses théories au fil du temps. Selon l'une d'elles, connue sous le nom de théorie de la condensation, la Lune et la Terre se seraient formées ensemble dans le Système solaire naissant, près de l'endroit où elles se trouvent aujourd'hui. Une autre, la théorie de la fission, soutient que la Terre aurait été plus grosse à l'origine et que pendant sa formation elle aurait tourné si vite que des morceaux se seraient détachés et auraient fusionné, formant ainsi la Lune.

» ILY A 4,1-3,9 MILLIARDS D'ANNÉES

Le Système solaire est un monde dangereux. Des roches volent encore, percutant tout ce qui se trouve sur leur chemin. La surface de la Lune présente des traces de cette époque.

👉 Cette série de bombardements a laissé des traces sur les planètes environnantes, mais sur la Terre, l'activité géologique en a effacé la plupart.



Impacts sur la Lune



Barrage cosmique de la Terre

» ILY A 2,5-1 MILLIARDS D'ANNÉES

On pense que c'est à ce moment-là que le champ magnétique de la Lune s'est épuisé.

» ILY A 3,8 MILLIARDS D'ANNÉES

Sur Terre, les microbes sont apparus. Il pourrait s'agir de la première trace de vie sur notre jeune planète.



Passé volcanique

« ILY A 3,5 MILLIARDS D'ANNÉES

La surface de la Lune abrite des volcans actifs, qui auraient pu cracher de la matière gazeuse en quantité suffisante pour créer une atmosphère plus dense.



Petits pas et bonds de géant

ATMOSPHÈRE ? QUELLE ATMOSPHÈRE ?

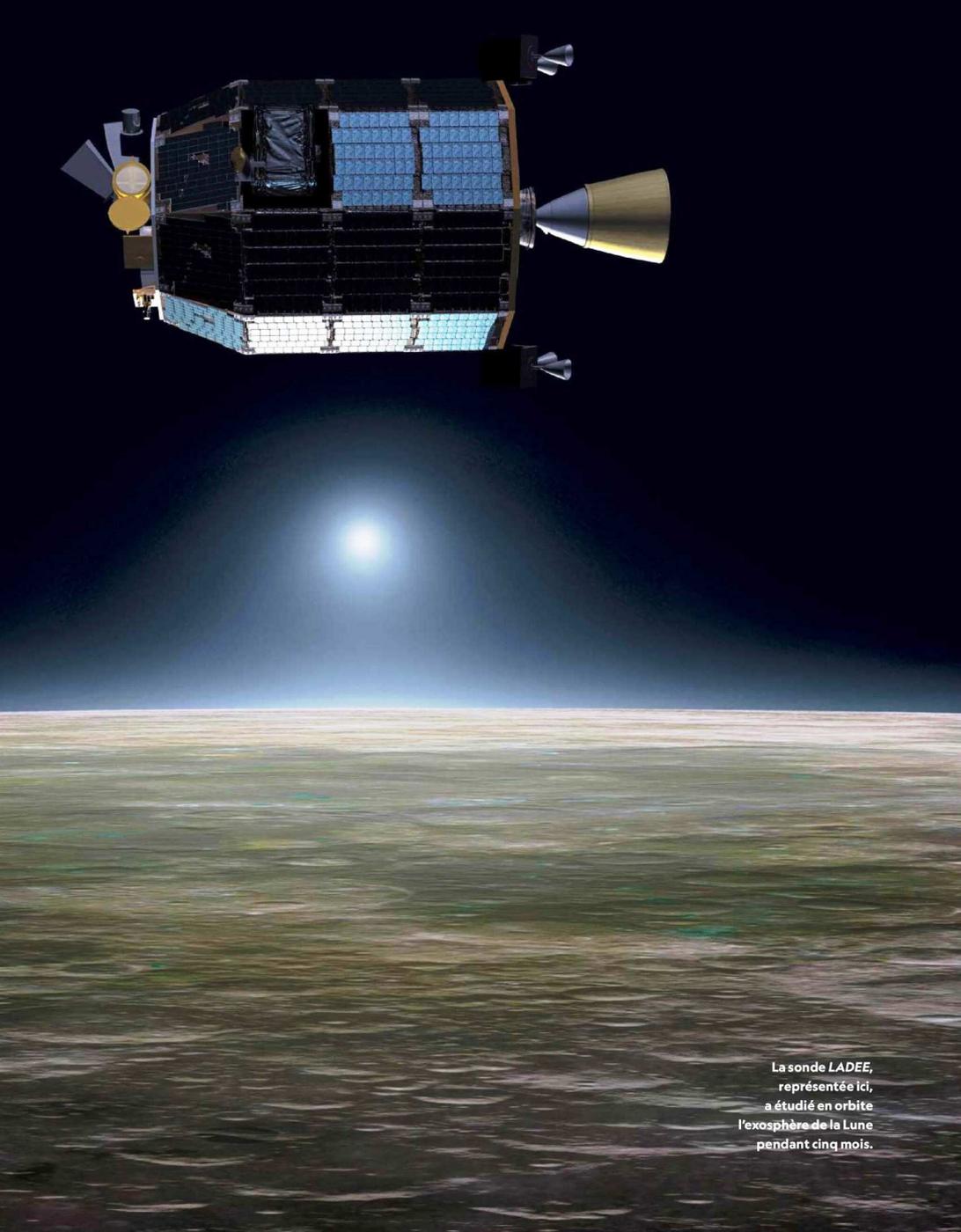
La Lune possède une atmosphère très ténue, à tel point que les scientifiques la qualifient d'exosphère. Il est presque impossible de la distinguer de l'espace. Dans l'atmosphère terrestre, les molécules s'entrechoquent en permanence, mais l'exosphère lunaire en contient si peu qu'elles n'entrent presque jamais en collision. Elle a une densité égale à environ un trillionième de celle de l'atmosphère terrestre au niveau de la mer.

Certains scientifiques émettent l'hypothèse qu'il y a 3 à 4 milliards d'années, l'atmosphère de la Lune était beaucoup plus épaisse car elle provenait des gaz rejetés par d'anciens volcans. Nous savons en effet que notre satellite a abrité des volcans actifs grâce aux échantillons rapportés par les différentes missions qui contiennent du basalte - de la lave refroidie. Les mers sombres visibles à la surface de l'astre sont en réalité des plaines de lave gigantesques.

En 2013, des scientifiques de la Nasa ont envoyé une sonde étudier les molécules et les poussières de la fine exosphère lunaire. Le *Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer (LADEE)* a orbité pendant environ six mois avant de s'écraser intentionnellement sur la Lune. Grâce à cet appareil, les scientifiques savent aujourd'hui que les gaz les plus répandus dans cette exosphère sont l'hélium, le néon et l'argon. Les deux premiers proviennent du Soleil, qui émet un vent constant de rayonnement et de gaz. L'argon est, quant à lui, issu de processus radioactifs dans les roches lunaires.

Les chercheurs ont aussi découvert que, lorsque des météorites frappent l'astre, la collision chauffe la poussière de surface, la vaporise et l'envoie dans l'exosphère. *LADEE* a ainsi détecté plus de sodium et de potassium dans celle-ci après qu'un nombre inhabituel de météorites se furent écrasées sur la surface lunaire. ■

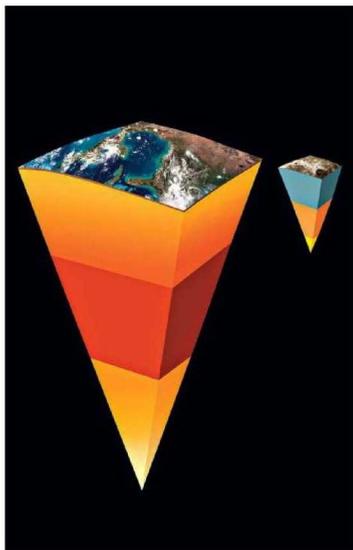




La sonde **LADEE**,
représentée ici,
a étudié en orbite
l'exosphère de la Lune
pendant cinq mois.

VOYAGE À L'INTÉRIEUR DE LA LUNE

Les scientifiques n'ont pas seulement concentré leurs recherches et leurs prélèvements sur la surface de la Lune. Ils ont aussi entrepris d'en apprendre davantage sur ses entrailles. Grâce au programme *Apollo* et aux recherches ultérieures, ils ont découvert que, comme la Terre, la Lune se compose de différentes couches : au centre, un noyau de fer solide est enchâssé dans un noyau extérieur liquide ; autour du noyau se trouve le manteau, qui constitue la majeure partie du volume de l'astre – ces deux niveaux tournant autour d'axes légèrement différents ; enfin la croûte lunaire enveloppe le tout.

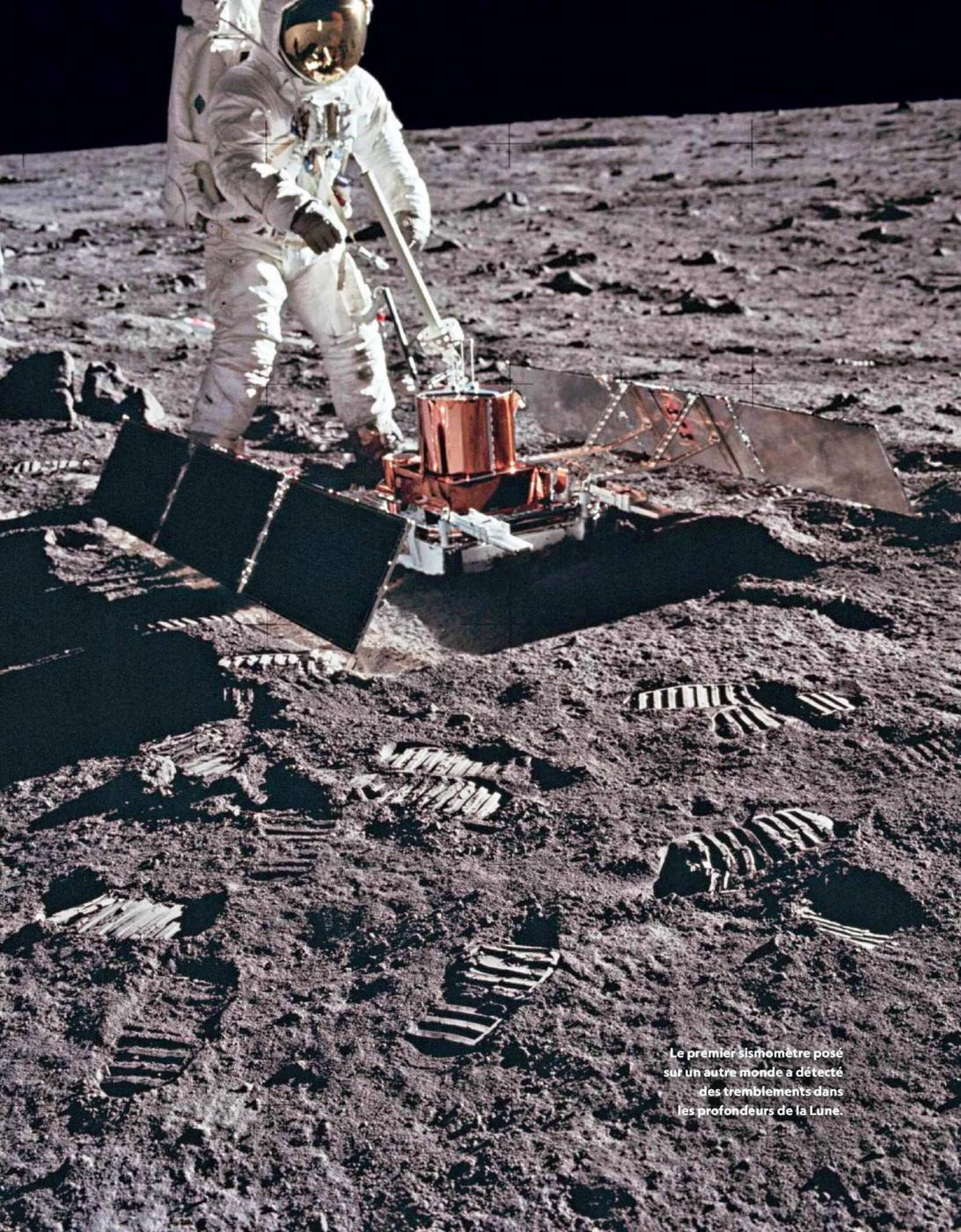


La Lune et la Terre sont toutes deux composées de plusieurs couches : un noyau (au centre), deux couches de manteau et une croûte.

À la surface de notre satellite, les hauts plateaux montagneux sont principalement constitués d'anorthosite, une roche blanchâtre ; les mers volcaniques et d'autres formations similaires sont couvertes de basalte ; les cratères d'impact quant à eux contiennent des brèches (des roches chauffées, écrasées, brisées, puis fusionnées en de fascinants conglomérats). La couche supérieure de la croûte, la régolithe, se compose d'un sol gris de poussières fines – produit de milliards d'années de chutes de micrométéorites – mélangées à de petites roches et à des billes de verre.

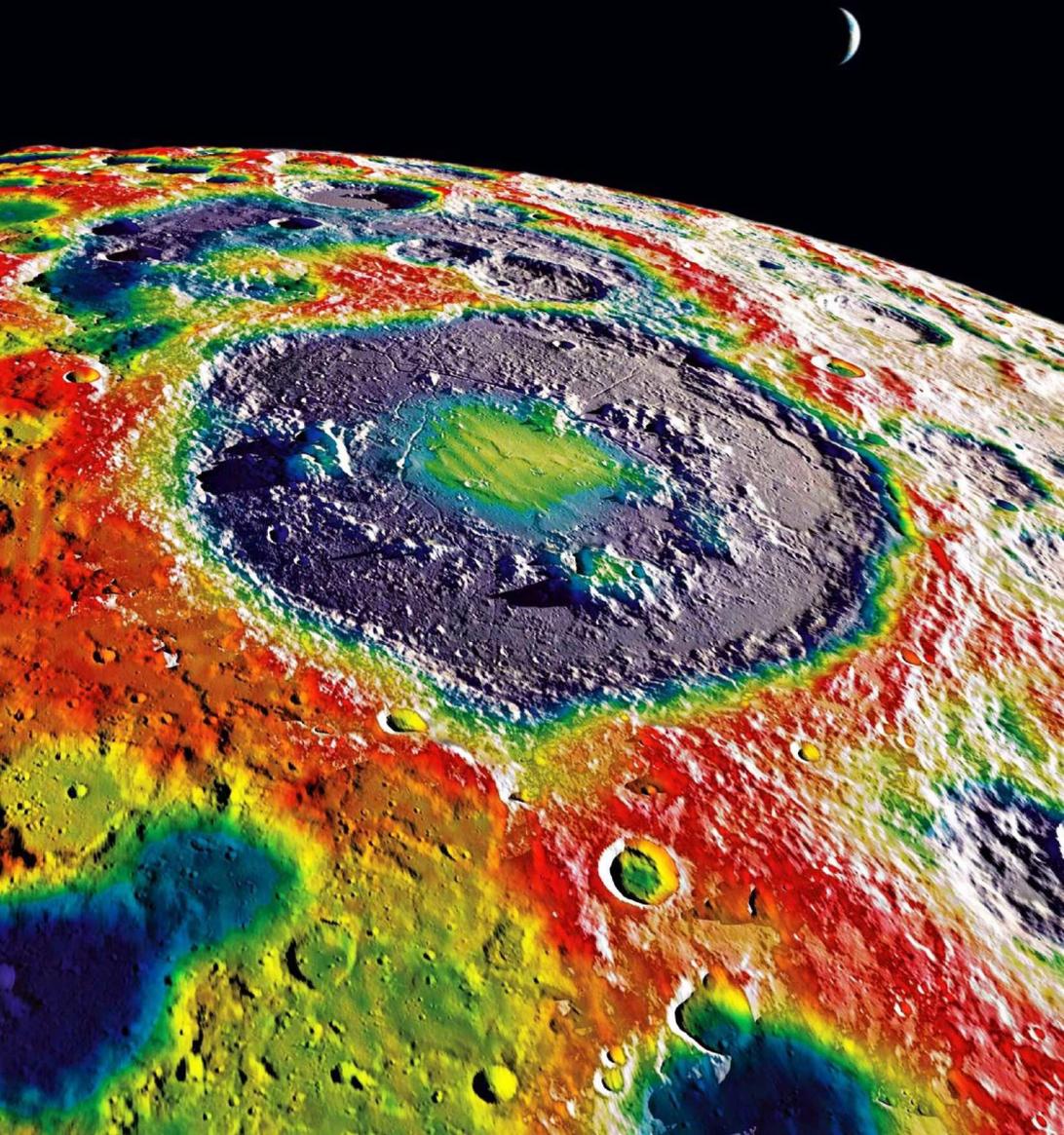
La profondeur de la croûte lunaire peut varier entre 0 et 60 km, selon que la zone considérée contient un cratère d'impact ou qu'elle présente des formations de haute altitude, comme les hauts plateaux montagneux de la face cachée. Mais ce ne sont pas les seules variations dans la croûte lunaire. Celle-ci est notamment plus épaisse sur la face cachée, et semble y avoir une composition différente de celle de la face visible. D'autre part, la Lune n'est pas parfaitement sphérique – elle a une forme un peu allongée, comme un œuf. Cela s'explique par le fait que, il y a des milliards d'années, elle était 10 à 20 fois plus proche de la Terre. Elle s'est retrouvée très tôt figée dans la position qu'elle occupe aujourd'hui, avec le même côté tourné vers nous, ce qu'on appelle le verrouillage gravitationnel. Et parce que cette face était davantage exposée à la gravité terrestre, la Lune s'est étirée et a gardé cette forme.

À cette époque, les deux astres étaient extrêmement chauds l'un et l'autre, et notre satellite était encore recouvert d'un océan de magma surmonté d'une croûte. La gravité terrestre pressait et étirait les entrailles liquides de la Lune. Autant de mouvements qui participaient à conserver ses hautes températures. Les différences d'épaisseur dans la croûte lunaire s'expliqueraient ainsi par le fait que les deux faces de l'astre ont été exposées à des températures *(suite page 92)*

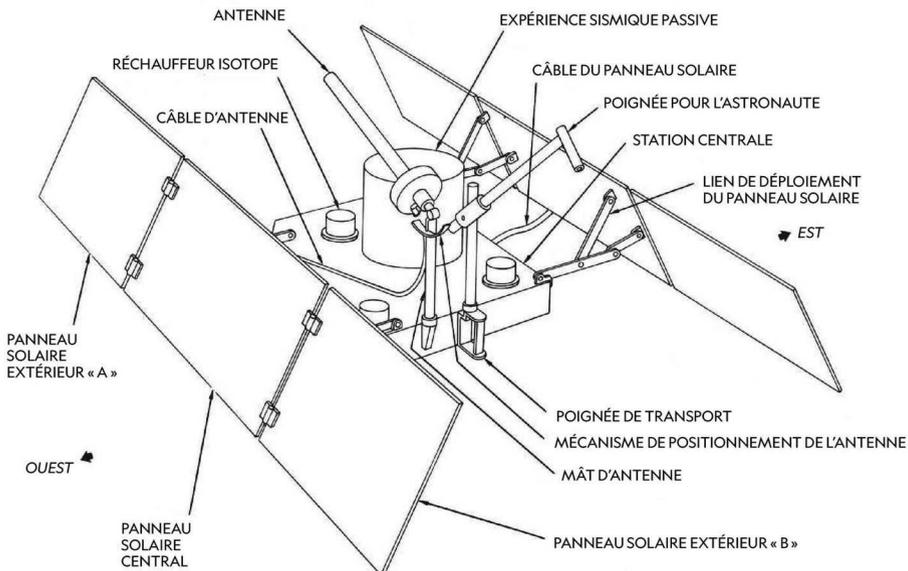


Le premier sismomètre posé
sur un autre monde a détecté
des tremblements dans
les profondeurs de la Lune.

Sur cette reproduction de la Lune avec ajout de couleurs, le bleu indique une gravité faible (des cratères, par exemple) et le rouge et le jaune, une gravité plus élevée (des montagnes).



LA CHASSE AUX ONDES



Les astronautes d'Apollo 11 ont apporté ce sismomètre sur la Lune. Pendant trois semaines, celui-ci a recueilli des informations sur la force, la durée et la direction approximative des vibrations sous sa surface.

Séismes célestes

La Lune tremble, tout comme la Terre. Les missions *Apollo 12, 14, 15* et *16* ont laissé des sismomètres complexes sur notre satellite et, jusqu'à ce qu'ils soient mis hors service en septembre 1977, ils ont détecté ses tremblements. Les quatre instruments étaient disposés en triangle. En comparant l'intensité et la chronologie des secousses, les scientifiques ont pu en savoir plus sur la structure interne de la Lune. Au cours des huit années de leur utilisation, 28 tremblements de lune peu profonds ont été détectés, dont sept d'une magnitude estimée à 5, tandis que la plupart des tremblements profonds étaient d'une magnitude inférieure à 2.



Les sondes du programme *Grail* survolant la Lune transmettent à la Terre les données relatives aux différences gravitationnelles perçues.

(suite de la page 88) différentes. La partie cachée aurait refroidi, tandis que la face visible depuis notre planète aurait été chauffée par la Terre.

INDICES GÉOLOGIQUES

Les chercheurs estiment donc que la Lune était autrefois très chaude, une théorie accréditée en particulier par des échantillons rocheux. Chaque type de roche est constitué d'une combinaison de minéraux. Or, certaines de celles collectées sur l'astre renferment des éléments qui ne se forment qu'à des températures très élevées.

Aujourd'hui, les principales hypothèses sur la formation de notre satellite impliquent toutes un impact géant. Cette collision à haute énergie aurait produit des

Effet de gravité

L'objectif de la mission *Grail* (*Gravity Recovery and Interior Laboratory*) était d'en savoir plus sur les profondeurs de la Lune en créant la carte gravitationnelle la plus précise à ce jour. *Grail* se composait de deux engins spatiaux se suivant en orbite autour de la Lune. Les deux sondes pouvaient envoyer et recevoir des signaux micro-ondes et étaient équipées d'ordinateurs pouvant calculer le temps de parcours des signaux entre les deux engins. Si l'une des sondes survolait une région où la masse était concentrée, la gravité rapprochait l'engin de cette zone. Les sondes détectaient alors toute variation de distance entre elles, même inférieure à la largeur d'un cheveu.



températures si extrêmes que la roche se serait liquéfiée. Par conséquent, la Lune a commencé par être un corps céleste en fusion. Au fur et à mesure, elle s'est refroidie, solidifiée, et les minéraux se sont formés. Ces éléments solides, plus denses que la roche liquide qui les entourait, ont coulés et se sont agrégés autour du noyau de la Lune. En d'autres termes, le magma s'est solidifié essentiellement de l'intérieur vers l'extérieur.

Il n'a fallu que 10 000 ans pour que 80 % de l'océan magmatique de la Lune se solidifie, mais « une fois que ce pourcentage a été atteint, les choses deviennent intéressantes », explique Viranga Perera, qui effectue des recherches sur la structure interne de la Lune à l'université américaine Johns Hopkins, à Baltimore. C'est à ce moment-là que le feldspath plagioclase (un minéral) et l'anorthosite (une roche) ont commencé à se stabiliser. Et contrairement à d'autres roches, ils étaient moins denses que le magma environnant, donc ils flottaient. Ils ont alors migré jusqu'au sommet et ont pris en

sandwich le magma liquide restant entre la croûte nouvellement formée et la roche déjà solidifiée en dessous. Ce qui restait de la roche liquide a mis beaucoup plus de temps à refroidir.

Les modèles informatiques concluent qu'il a fallu des dizaines de millions d'années pour que l'océan de magma restant se solidifie. Cependant, les échantillons récoltés sur la Lune indiquent, eux, une durée d'environ 100 ou 200 millions d'années. Ils proviennent presque exclusivement de la croûte ou d'une partie de la lave qui a existé sous forme de magma plus en profondeur et qui a jailli lors de processus volcaniques. Les études de la structure interne de la Lune suggèrent que les matériaux du manteau sont plus denses que les roches de la croûte. L'absence d'éléments du manteau parmi les échantillons récoltés suscite les interrogations des chercheurs. L'impact de gros projectiles aurait dû soulever des matériaux issus des couches plus profondes lorsqu'ils ont créé les bassins de surface. ■

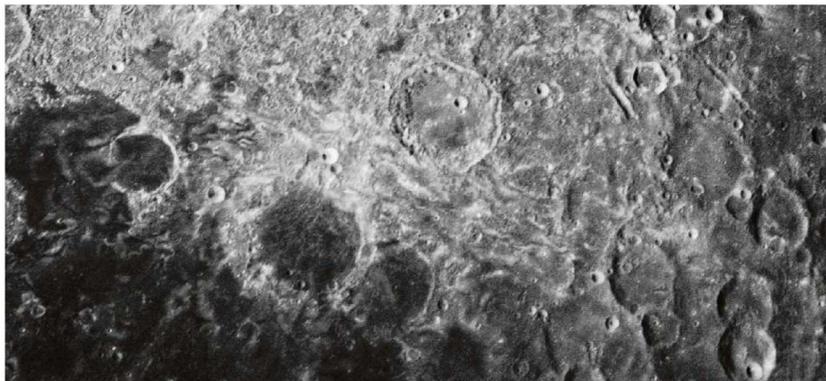
NUIT MAGNÉTIQUE

Les champs magnétiques sont des zones de l'espace où des objets sont mis en mouvement par l'influence de particules chargées. La plupart des matériaux ont des propriétés magnétiques, lesquelles se comportent différemment en fonction de la nature de ces derniers lorsqu'elles sont exposées à un champ magnétique. Celui-ci est généré par un effet-dynamo, soit le processus par lequel le mouvement fluide d'un matériau conducteur crée un courant électrique, lui-même générateur du champ magnétique. Les géophysiciens pensent que le magnétisme de la Terre est produit par les mouvements du fer liquide qui compose son noyau. Les scientifiques appellent cela l'« effet dynamo ».

Ce champ magnétique forme une sorte de bulle autour de notre planète, attirant ou déviant les particules chargées. Il contribue à protéger la Terre des explosions de rayonnement solaire (en déviant les radiations nocives vers l'espace) et participe également à la création des « aurores polaires », ces ballets de lumière que l'on voit dans le ciel près des pôles.

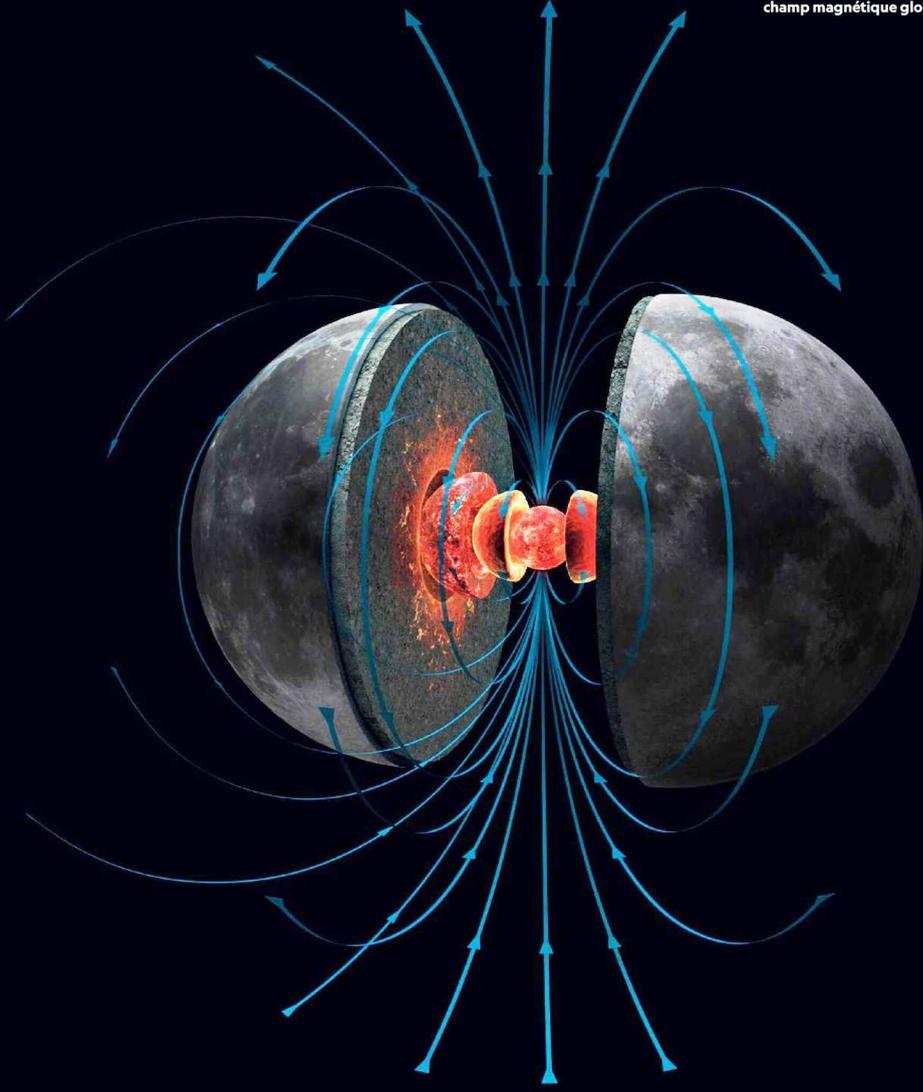
La plupart des planètes du Système solaire possèdent un champ magnétique, mais ce n'est pas le cas de nombreux objets plus petits. La Lune, par exemple, est dépourvue de champ magnétique global, un fait qui a rendu particulièrement surprenante l'une des premières découvertes scientifiques du programme *Apollo* : les astronautes avaient déterminé à l'aide de magnétomètres que certaines de ses roches de surface étaient magnétiques. Était-ce la preuve qu'à un moment donné la Lune avait possédé un champ magnétique global avec un effet dynamo propre à son noyau ? La question est toujours débattue.

« En fait, toutes les roches, qu'elles soient terrestres ou lunaires, contiennent généralement une forme de minéral magnétique », explique Sonia Tikoo, paléomagnétiste à l'université américaine Rutgers. Elle y étudie les traces d'anciens champs magnétiques enregistrées dans les roches. Sur la Lune, les roches contiennent ainsi du fer qui, s'il est présent au moment où elles se forment – par exemple à partir d'une coulée de lave qui se refroidit et se solidifie –, « enregistrera l'orientation de



Les scientifiques pensent que les tourbillons lunaires – au centre de cette image de Mare Marginis – sont liés au champ magnétique, mais ils ne savent pas exactement ce qui les provoque.

Au début de l'histoire de la Lune,
le fer liquide en mouvement
dans son noyau a pu générer un
champ magnétique global.



L'astronaute géologue
d'*Apollo 17* Harrison Schmitt
s'apprête à prélever une roche
lunaire qui sera étudiée sur
Terre. Les chercheurs étudient
encore aujourd'hui des
échantillons de cette mission
pour analyser l'ancien champ
magnétique de la Lune.





Quand le champ magnétique terrestre capte des particules à haute énergie provenant de projections solaires, ces particules peuvent interagir avec les gaz de l'atmosphère et créer les aurores polaires.

n'importe quel champ magnétique existant dans l'environnement à ce moment-là. Cette magnétisation est enregistrée de façon semi-permanente ».

Puisque les champs magnétiques ont besoin d'une dynamo, si la Lune avait effectivement possédé un champ magnétique global, cela indiquerait que l'intérieur de l'astre était suffisamment chaud pour former un noyau métallique séparé, entouré d'un manteau. Cela impliquerait aussi qu'une force ait déclenché le mouvement du métal liquide, générant ainsi ce champ. Le débat est compliqué par le fait que tous les échantillons provenant de la Lune ne présentent pas un magnétisme stable. On ignore si cela est dû à l'absence de champ magnétique global ou à la faiblesse de celui-ci, et au fait que les roches enregistraient moins les propriétés magnétiques.

Pour Sonia Tikoo et ses collègues, la Lune possédait un fort champ magnétique il y a 4,25 milliards à 3,5 milliards d'années. « Il était, en moyenne, à peu près aussi fort que le champ magnétique terrestre actuel », explique-t-elle. Celui de la Lune s'est ensuite affaibli et « est resté dans un état plus faible jusqu'à il y a au moins 2,5 milliards d'années, peut-être même jusqu'à il y a un milliard d'années ». Mais les chercheurs n'ont trouvé des signes d'un tel champ que dans quelques échantillons. Ils espèrent que de nouveaux prélèvements pourront les aider à trouver des réponses aux questions qui subsistent. ■

Anomalies lumineuses

« Les tourbillons lunaires sont l'une des caractéristiques les plus attrayantes du Système solaire, explique Sonia Tikoo à propos de ces marques brillantes et sinueuses sur la surface de la Lune. Les raisons de leur apparition sont obscures, mais nous savons que les zones où on les observe comptent parmi les plus fortement magnétisées de la croûte lunaire. » L'une des théories avancées par les scientifiques est que ces phénomènes sont liés à un magnétisme localisé, causé par des anomalies magnétiques dans la croûte lunaire.



UN PARC NATUREL DE VOLCANS

La surface tapissée de cratères de la Lune ne raconte pas seulement une histoire marquée par les impacts d'autres objets célestes. Elle atteste aussi de son passé volcanique.

Sur sa face visible, les coulées de lave, qu'on a appelées des « mers », sautent aux yeux. La surface de la Lune abrite des dômes volcaniques (qui se forment lorsque le magma épais et collant atteint la surface et s'accumule autour de l'événement) et des rilles sinueuses, des canaux de lave de plusieurs kilomètres de long souvent situés à proximité de petites fosses rondes.

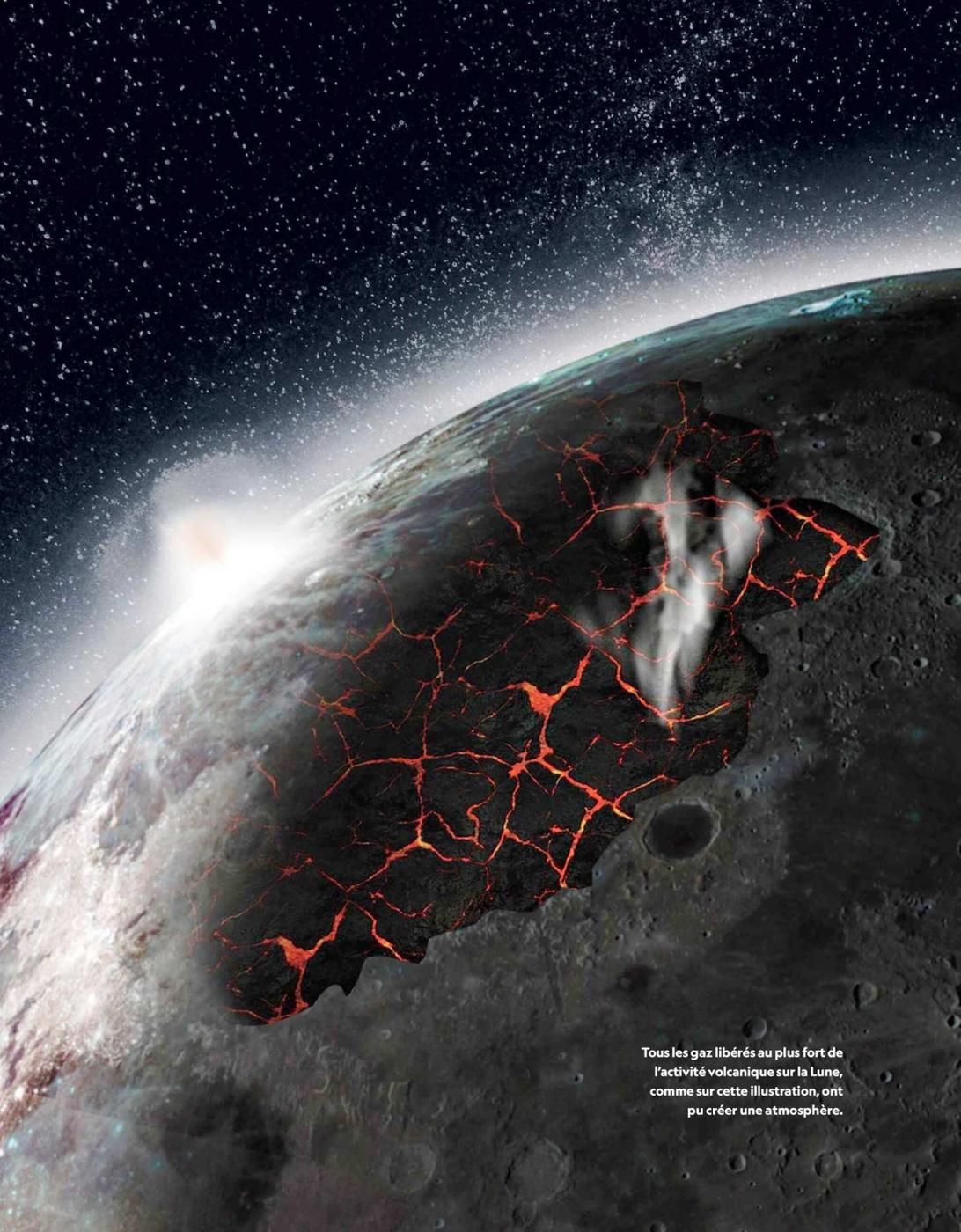
Les chercheurs ont aussi découvert à la surface de l'astre des dépôts de lave plus petits et de formes irrégulières, qu'ils ont appelés des « taches irrégulières de mers » (IMP). Ces marques dans le sol ont été aperçues pour la première fois sur des photos prises par l'équipage d'*Apollo 15* en orbite. Les chercheurs en ont depuis trouvé des dizaines. Leur apparence est surprenante : elles pourraient témoigner d'un volcanisme beaucoup plus récent qu'on ne l'a longtemps soupçonné.

Dans une étude publiée en 2015 des chercheurs ont analysé 70 IMP et les cratères les surmontant. En se basant sur le taux moyen d'impacts des corps célestes et sur les modèles chronologiques mis au point au fil des décennies, les auteurs de l'étude pensent que ces IMP sont apparues il y a environ 100 millions d'années. Soit une période récente à l'échelle astronomique. Ils espèrent qu'une mission partira un jour explorer l'une d'entre elles, en quête d'indices sur la surface lunaire qui indiqueraient une activité volcanique récente. Découvrir la preuve de ce phénomène constituerait une grande avancée, car à ce jour, tous les éléments récoltés indiquent que la Lune est froide et volcaniquement inactive depuis un milliard d'années.

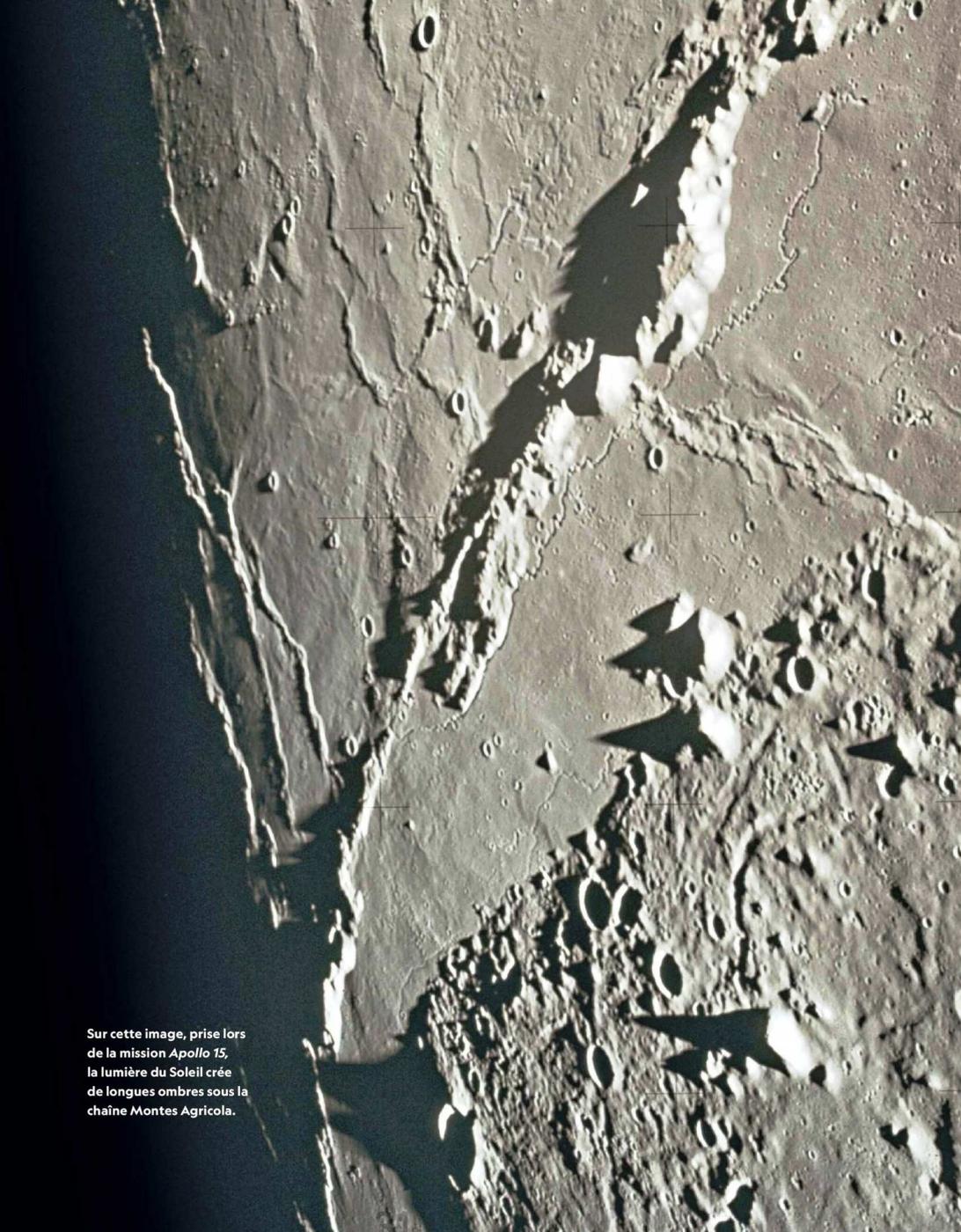
Au début de son histoire, les entrailles de notre satellite étaient en fusion. Lorsqu'il s'est refroidi, sa croûte s'est solidifiée, puis des fissures se sont formées à la surface et du magma a suinté. La lave a ensuite rempli les bassins d'impact créés par des collisions pendant la période que les scientifiques ont appelée le Grand



Vallis Schröteri, la plus grande rille lunaire – un canal qui transportait de la lave chaude à partir de petits puits –, est un vestige du passé volcanique de la Lune.



Tous les gaz libérés au plus fort de l'activité volcanique sur la Lune, comme sur cette illustration, ont pu créer une atmosphère.



Sur cette image, prise lors de la mission *Apollo 15*, la lumière du Soleil crée de longues ombres sous la chaîne Montes Agricola.



Cette photo de la région des collines Marius présente des rilles sinueuses, des fosses occasionnelles (que l'on pense être des trous dans des tunnels de lave), et des volcans boucliers de faible altitude.

bombardement tardif (une période d'augmentation notable des impacts météoriques il y a 3,9 à 4,1 milliards d'années). La lave s'est solidifiée, créant les mers géantes que nous voyons à la surface. Ces volcans n'étaient pas aussi grands que les volcans terrestres, néanmoins la gravité plus faible de la Lune a permis à la lave de s'écouler plus loin. Les roches prélevées fournissent une preuve supplémentaire de l'existence de volcans actifs. En effet, les astronautes d'*Apollo* ont ramené du basalte en quantité, c'est-à-dire de la lave refroidie et solidifiée.

Certains de ces échantillons contiennent aussi de petites billes de verre, qui se seraient formées lorsque la matière lunaire a été chauffée par ce qu'on appelle les « fontaines de feu » (des éruptions de lave à la surface). L'analyse des morceaux de basalte a révélé de grandes variations dans leur âge et leur composition. La plupart datent d'environ 3 milliards à 3,9 milliards d'années, ce qui laisse penser que c'est à cette époque que l'activité volcanique sur la Lune était la plus intense. Les chercheurs attendent avec impatience les prochaines missions de collecte d'échantillons sur notre satellite. Ils espèrent que ceux-ci apporteront un nouvel éclairage sur l'ancienneté des volcans. Ils savent du reste, grâce à des cartes récentes, que d'autres types de basaltes sont présents sur la Lune. Et quantité de sites restent encore à explorer. ■

Tous aux abris

À la surface de la Lune, les scientifiques ont découvert plus de 200 fosses, dont la taille varie entre 5 m et 1 km. Elles se seraient formées lorsque les plafonds des tunnels de lave ou d'autres cavités souterraines comme celles que l'on trouve sur Terre (image ci-dessous) se sont effondrés. Les experts ont suggéré que ces fosses et grottes pourraient servir d'abris à de futurs astronautes. Un habitat construit sous un surplomb pourrait protéger les humains des radiations spatiales nocives et des micrométéorites.



LES DEUX FONT LA PAIRE

La Lune n'est pas seulement le corps céleste le plus proche de la Terre. Les deux astres sont interconnectés, tout comme les processus qui les ont façonnés. « La Lune est à elle seule un monde fascinant, mais elle nous raconte [aussi] une histoire sur la Terre et le Système solaire », explique le planétologue Bill Bottke. Elle nous renseigne sur ce qui est arrivé aux planètes internes – la Terre, Mars, Vénus et Mercure – au cours des 4,6 milliards d'années d'existence du Système solaire, et surtout au cours des 500 premiers millions d'années.

Les scientifiques savent que la proto-Terre a dû se former peu de temps après la naissance des premiers corps célestes de notre système planétaire. Les fragments de matière les plus anciens que les chercheurs ont

trouvés et mesurés sont des morceaux d'astéroïdes vieux de 4,567 milliards d'années. Des études des roches lunaires estiment quant à elles que la Lune a 4,51 milliards d'années. Il est admis que la Terre a dû se former entre ces deux dates, mais les plus anciennes roches trouvées sur notre planète ont moins de 3,9 milliards d'années. Les chercheurs supposent que cette période intermédiaire était caractérisée par un bombardement intensif de planètes et d'astéroïdes – une sorte de peloton d'exécution cosmique. La proximité de la Lune par rapport à la Terre signifie que ce qui est arrivé à notre compagne est probablement arrivé à notre planète. Mais cette dernière est un monde géologiquement actif, qui restructure constamment sa surface par des processus dynamiques tels que la tectonique des plaques, le volcanisme, l'érosion par l'eau et le vent. Si nous voulons savoir ce qui est arrivé à la Terre pendant ces bombardements intenses, nous devons chercher des indices sur la Lune.

Les scientifiques ont trouvé moins de 200 cratères d'impact sur notre sol, alors qu'ils en ont cartographié des milliers sur notre satellite. Sa face visible montre les traces des roches qui s'y sont écrasées. Statistiquement, la Terre ayant une plus grande surface et une plus grande force gravitationnelle, elle aurait dû subir plus de collisions dues à des objets célestes de plus grande taille.

Mais les roches et les protoplanètes ne sont pas les seuls éléments à impacter les corps du Système solaire. Le Soleil projette un vent de particules et de radiations à haute énergie, y compris des explosions géantes occasionnelles appelées éruptions solaires. D'autres événements astronomiques dynamisent les particules, qui volent ensuite sur des trajectoires à grande vitesse dans le cosmos. Le champ magnétique de la Terre et son atmosphère empêchent une grande partie de ces matériaux d'atteindre sa surface. La Lune, en revanche, n'a pas d'atmosphère assez dense et ne possède pas de champ magnétique global. En examinant l'altération de sa surface, nous en apprenons davantage sur le vent solaire et les rayons cosmiques qui sont dirigés vers la Terre.



La Terre a subi l'impact de météorites (comme illustré ci-dessus) il y a des millions d'années, tout comme la Lune.

Le Meteor est l'un des cratères d'impact les mieux préservés sur Terre. Il est situé en Arizona, aux États-Unis.





Pour découvrir comment la vie est apparue sur notre planète, il est crucial de mieux comprendre les débuts de l'ère des impacts cosmiques. Les premiers signes de vie microbienne remontent à environ 3,5 milliards d'années, mais les fossiles semblent indiquer que ces formes de vie évoluaient déjà depuis des centaines de millions d'années. Cela amène les scientifiques à se demander si la vie est apparue après l'arrêt du barrage cosmique, ou si plusieurs types d'organismes avaient déjà vu le jour auparavant, parmi lesquels seuls ceux qui ont réussi à survivre ont évolué et persisté. Ce sont des questions sur lesquelles planétologues et astrobiologistes continuent de débattre.

En savoir plus sur la chronologie et l'ampleur des impacts sur la Lune peut aussi éclairer des événements plus récents sur la Terre. Bottke et ses collègues ont

étudié le rapport entre les deux et trouvé des preuves d'un changement dans la fréquence des impacteurs il y a 290 millions d'années, tant sur la Terre que sur la Lune.

Afin de percer certains des grands mystères qui subsistent, les scientifiques espèrent depuis longtemps trouver sur la Lune une météorite provenant de la Terre primitive. Après tout, n'a-t-on pas déjà trouvé sur Terre des météorites qui provenaient de la Lune et de Mars ? En 2019, cet espoir semble s'être concrétisé. Les scientifiques ont mis au jour un fragment de roche de quelques grammes récolté sur la Lune vieux de 4 milliards d'années susceptible de provenir de la Terre. Il était enfermé dans une roche lunaire de près de 9 kg surnommée « Big Bertha » rapportée par *Apollo 14*. Cette découverte ouvre une nouvelle fenêtre sur la Terre primitive. Elle pourrait non seulement démontrer que les roches



Le cycle météorologique de la Terre et la tectonique des plaques ont contribué à effacer les traces d'impacts anciens. La Lune, en revanche, les a conservées.

De la vie sur la Lune ?

Des scientifiques ont lancé l'idée que la Lune aurait pu être habitable à une époque lointaine. Peu après sa formation et sa solidification, sa chaleur aurait conduit à des dégazages de ce que l'on appelle les volatils, dont de l'eau. Si la Lune en avait libéré à un rythme suffisamment rapide, une partie de cette eau aurait pu rester à sa surface pour une courte période. Ce scénario nécessite également la présence d'une atmosphère lunaire qui aurait été produite par une activité volcanique.





Il y a près de 200 millions d'années, un astéroïde est entré en collision avec ce qui est aujourd'hui le Québec. Le réservoir de Manicouagan, large de près de 100 km, en témoigne.

granitiques des continents se formaient déjà, mais aussi confirmer que notre planète était bombardée de météorites dont l'impact était suffisamment important pour arracher des roches et les projeter jusqu'à la Lune. Les scientifiques espèrent trouver d'autres échantillons de Terre sur la Lune lors des prochaines missions, dont l'analyse chimique permettra d'en savoir plus sur le moment où la vie s'est développée et les conditions qui prévalaient à cette époque.

La compagne de notre planète n'est plus un monde étranger. L'étude scientifique approfondie de son sol a révélé qu'elle représente une immense source d'informations non seulement pour mieux comprendre la Terre mais aussi les débuts de notre Système solaire. C'est à David Kring, directeur de projet à l'Association des universités en recherche spatiale (USRA) et chercheur principal pour la Nasa dans l'équipe du Centre pour la science et l'exploration lunaires (CLSE), que l'on doit la découverte de la plus ancienne roche terrestre sur notre satellite. Il considère que « la Lune possède une bibliothèque vivante d'événements du Système solaire que l'on ne retrouve nulle part ailleurs ». Accéder de nouveau à ces archives constituera une entreprise cruciale pour l'avenir. ■

Le feu sous la glace

La surface de la Terre offre aussi son lot de découvertes inattendues. En 2015, des chercheurs ont détecté, caché sous le glacier Hiawatha, au Groenland, un cratère de la taille d'une ville comme Paris. Selon leurs analyses, il aurait été causé par un impact de météorite. Dans les sédiments étudiés près du site, on a en effet trouvé du quartz « choqué », un état minéral provoqué par des événements à haute énergie tels que les grands impacts. Les scientifiques estiment que celui-ci remonterait à 58 millions d'années.





La météorite de 12 km de large qui s'est écrasée dans l'océan près de la péninsule mexicaine du Yucatán il y a 65 millions d'années a probablement provoqué l'extinction des dinosaures.

CHAPITRE 4

RETOUR VERS LE FUTUR

Au cours des six dernières décennies, nous avons fait de grandes découvertes sur notre satellite. Mais la part d'inconnu est encore immense. Les agences spatiales de nombreux pays se lancent aujourd'hui dans des programmes ambitieux pour fouler à nouveau sa surface. Et écrire le prochain chapitre de l'exploration lunaire.

L'avenir des voyages dans l'espace n'est pas encore connu, mais il captive l'imagination des artistes, des scientifiques et des explorateurs.



DES SECRETS ENCORE BIEN GARDÉS

A partir de roches et de poussière, grâce à l'envoi d'engins spatiaux habités et de robots, les scientifiques ont tissé une histoire passionnante de la Lune. Pourtant, en dépit des données dont nous disposons déjà, la connaissance que nous avons de notre satellite demeure très limitée. Une grande partie de ce que nous savons repose sur les quelques centaines de kilos d'échantillons des missions *Apollo* (américaines), *Luna* (soviétiques), et *Chang'e* (chinoises), des prélèvements effectués seulement en dix endroits de la Lune, tous sur la face visible.

« Les échantillons dont nous disposons ne sont tout simplement pas en mesure de nous donner une image complète de la Lune », souligne le planétologue Bill Bottke. De même, si les scientifiques étudiaient des roches ne provenant que d'une douzaine d'endroits sur la Terre, il leur serait impossible d'avoir une connaissance globale de notre planète.

Pour parfaire ce tableau lunaire, il nous faudrait des éléments provenant de sa face cachée. À cet égard, un nouveau chapitre de l'exploration de notre satellite s'est ouvert avec l'atterrissage, le 3 janvier 2019, du véhicule chinois *Chang'e 4* sur ce côté, dans le cratère Von Kármán. Celui-ci est situé dans le bassin Pôle Sud-Aitken (SPA), l'un des plus grands et des plus anciens sites d'impact du système solaire. Les caméras de l'atterrisseur et du rover *Yutu-2* qui a ensuite arpenté la surface de la Lune ont transmis des images inédites de sa face jusque-là inexplorée. Les engins, équipés de divers instruments pour mesurer notamment le champ électrique généré par les tempêtes solaires ou étudier la géologie de l'astre, poursuivent à ce jour leur mission. Le bassin Pôle Sud-Aitken s'étend sur près d'un quart de la Lune. Connaître son âge permettrait de déterminer à quel moment se sont produits les autres impacts majeurs du système solaire interne.

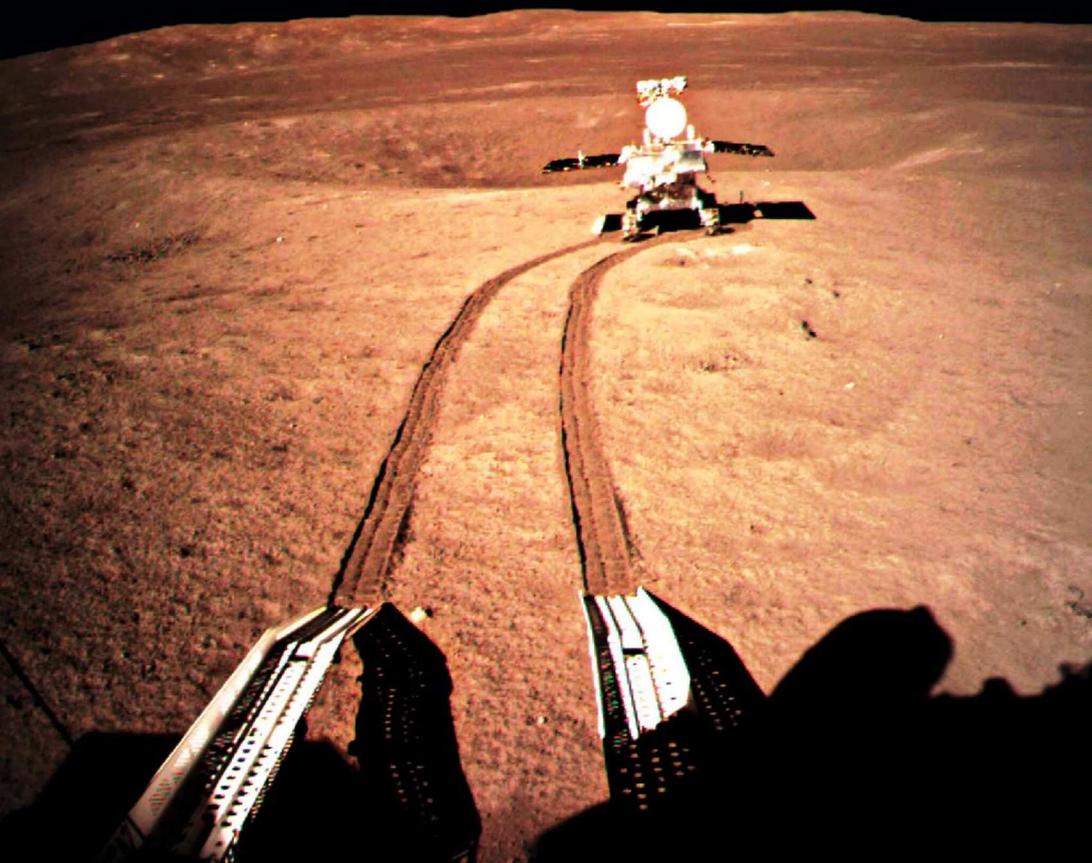


Il y a des milliards d'années, des astéroïdes traversaient le système solaire provoquant de fréquentes collisions. Mais on ignore quand les plus fortes concentrations de bombardements ont eu lieu.



Sur cette photo prise par l'équipage d'*Apollo 13* en 1970, des rayons lumineux semblent émaner d'un cratère situé sur la face cachée de la Lune.

Le rover chinois de la mission *Chang'e 4* a roulé, en janvier 2019, sur la face cachée de la Lune, laissant ses traces dans la poussière.





Après des décennies d'analyses de roches, de mesures scientifiques et d'affinement des modèles informatiques, la naissance de la Lune laisse toujours perplexes les chercheurs.

Du reste, les découvertes se poursuivent sur la face visible. La mission indienne *Chandrayaan 3* y a posé un engin le 23 août dernier, près du pôle Sud de l'astre. Le rover *Pragyan* a notamment confirmé la présence de soufre à sa surface, qui pourrait être un vestige des roches en fusion qui recouvraient la Lune primitive, à moins qu'il ne soit lié à d'anciens impacts de météorites.

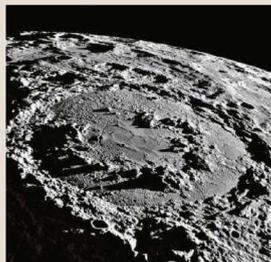
Les scientifiques aimeraient par ailleurs analyser le manteau de la Lune, souvent situé sous des kilomètres de croûte lunaire. La mission de cartographie gravitationnelle de la sonde *Grail* (2011-2012) a permis de découvrir que deux bassins d'impact – Crisium, sur la face visible, et Moscoviense, sur l'autre face – sont recouverts d'une couche de moins de 800 m de croûte, ce qui signifie qu'il pourrait être possible, à partir de

ces cratères, de forer plus profondément dans le manteau pour en extraire une carotte ou d'autres échantillons. Ceux-ci devraient permettre d'étudier plus en détail la teneur en eau de la Lune. Sans compter les autres ressources potentielles – rocheuses, gazeuses – présentes dans le sol lunaire.

D'autre part, pour mieux déterminer la chronologie de l'éventuel champ magnétique de la Lune – quand s'est-il formé ? Quelle était sa force ? Quand a-t-il disparu ? –, les chercheurs ont besoin de davantage d'échantillons géologiques d'âges différents et provenant de sites diversifiés. Il y a enfin la question cardinale que se posent les spécialistes : comment notre satellite est-il apparu ? Nous devrions obtenir nombre de réponses en explorant à nouveau la compagnie de la Terre. ■

Une cible parfaite ?

Sur la face cachée de la Lune, une zone en particulier intéresse les chercheurs : le bassin de Schrödinger, qui se trouve dans le bassin Pôle Sud-Aitken (SPA), plus vaste. Si le SPA est l'un des plus anciens cratères d'impact, Schrödinger compte parmi les plus jeunes. La collecte de matière pourrait permettre de déterminer à quel moment la majorité de ces collisions se sont produites. Grâce à la caméra embarquée à bord de la sonde en orbite de la Nasa *LRO*, les scientifiques ont même pu repérer des roches spécifiques qu'ils souhaitent récolter.



L'AVENIR DE L'EXPLORATION LUNAIRE

Après plus de cinquante ans d'absence, l'homme s'apprête à revenir sur la Lune. Ce nouveau chapitre de l'exploration de notre satellite se distingue par un activisme mondial inédit, marqué par le surgissement d'une myriade d'acteurs étatiques et privés.

Parmi les nouveaux venus dans ce grand jeu spatial figure la Chine. Le pays a réussi une première début 2019 avec *Chang'e 4*, le premier vaisseau à alunir sur la face cachée de l'astre. En 2020, *Chang'e 5* a suivi sur le côté visible. Quinze jours plus tard, cette mission rapportait sur Terre plus d'1,7 kg d'échantillons.

Outre-Atlantique, la Nasa reste en première ligne. L'agence américaine s'emploie à renvoyer des hommes sur la Lune à très brève échéance avec le programme

Artemis, initié par l'administration Trump et poursuivi sous la présidence de Joe Biden. Pour cela, elle a développé une nouvelle génération de lanceurs : le *Space Launch System (SLS)*. Le premier acte du programme *Artemis* a eu lieu lorsque le *SLS* a envoyé le vaisseau spatial *Orion* pour un vol d'essai sans équipage en direction de la Lune, le 16 novembre 2022. La mission *Artemis I* avait pour objectif de préparer l'envoi vers notre satellite d'une mission habitée. *Orion* est revenu sur Terre le 11 décembre 2022, après être demeuré dans l'espace sans s'amarrer à une station spatiale plus longtemps que tout autre vaisseau habitable avant lui.

Alors que l'Inde vient de poser un rover sur la Lune avec le programme *Chandrayaan*, et qu'un vaisseau japonais est en route depuis début septembre pour y déposer un robot d'exploration, le programme *Artemis* suit son cours. *Artemis II* vise à faire orbiter un équipage autour de la Lune. Le départ est prévu pour novembre 2024. Ce vol constituera un tremplin pour *Artemis III* qui devrait envoyer, fin 2025 ou début 2026, quatre astronautes sur la surface lunaire. Ils seront choisis au sein de la Nasa et des agences spatiales européenne, canadienne et japonaise partenaires d'*Artemis*. Ce sera le premier alunissage d'êtres humains depuis la mission *Apollo 17*, en 1972.

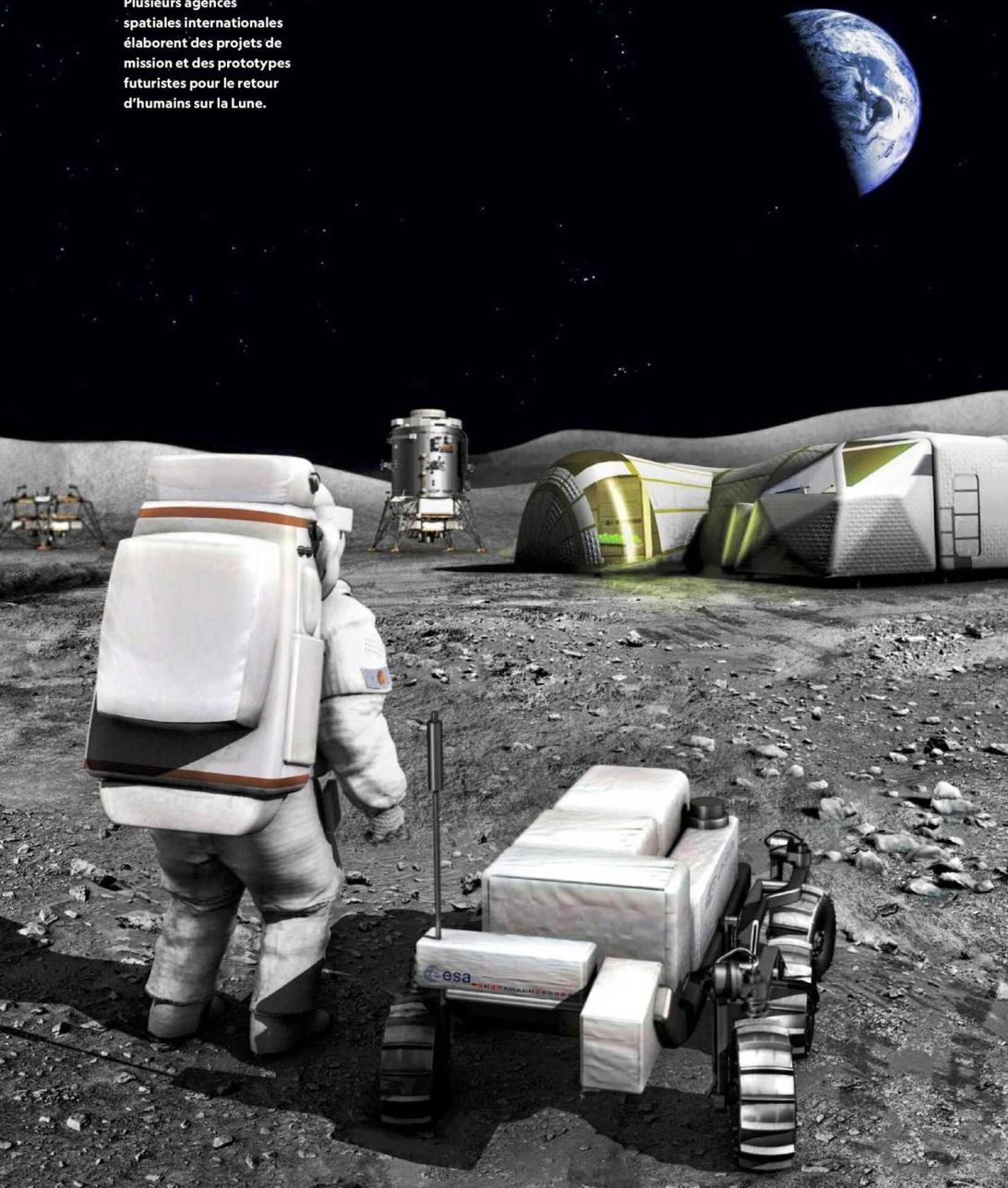
La Chine, quant à elle, développe son propre système de fusée de transport lourd, et les rumeurs suggèrent que le vol d'essai aura lieu vers 2030. La Russie n'est pas en reste. Elle a commencé de son côté à travailler sur la construction d'une fusée « super-lourde », qui, espère-t-elle, consolidera sa place dans la nouvelle course à l'espace. Ses ambitions lunaires ont toutefois connu un revers important lorsque la sonde *Luna 25*, la première à être lancée par le pays depuis 1976, s'est écrasée sur la Lune le 20 août dernier.

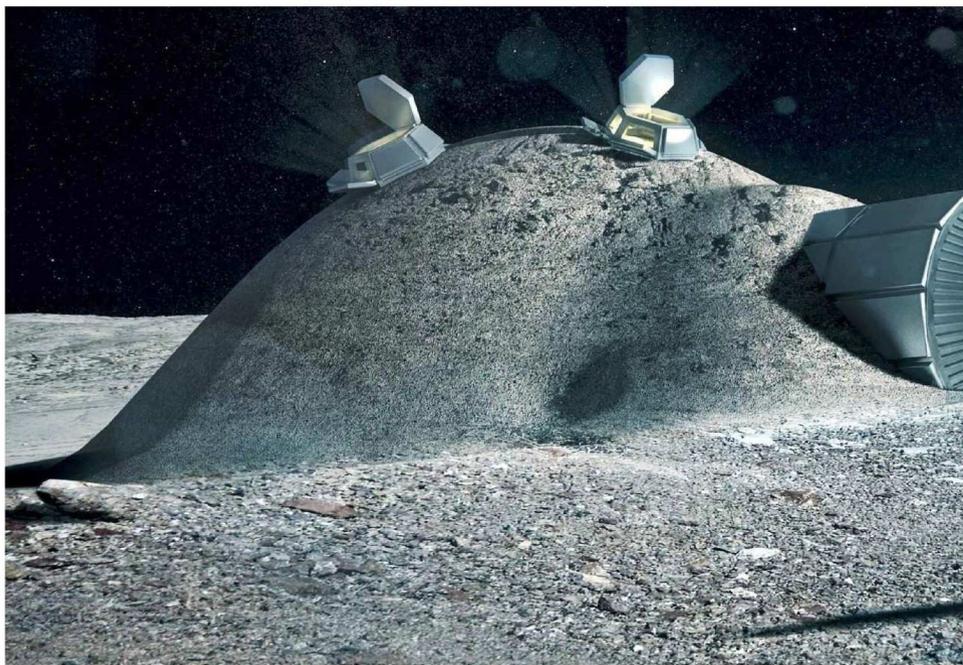
Nouveaux venus dans l'exploration spatiale, des entreprises privées développent également des projets de lanceurs. Blue Origin, la société de Jeff Bezos, travaille



Le programme chinois Yuegong 1 a testé en 2018 un système de survie biorégénérateur pendant 370 jours, dans un environnement autonome simulant une base lunaire.

Plusieurs agences spatiales internationales élaborent des projets de mission et des prototypes futuristes pour le retour d'humains sur la Lune.





à l'élaboration des fusées *New Glenn*. SpaceX, la compagnie d'Elon Musk, élabore quant à elle la fusée *Starship*, qui doit envoyer dans l'espace le vaisseau qui posera les astronautes d'*Artemis III* sur notre satellite. Pour aider à son financement, l'entreprise a vendu un vol autour de la Lune au milliardaire japonais Yusaku Maezawa, qui a invité huit artistes à être les premiers touristes lunaires. La date de ce voyage touristique n'a pas encore été arrêtée. D'autant que le premier lancement grandeur nature de *Starship* s'est soldé par un échec, l'engin ayant explosé quelques minutes après le décollage le 20 avril dernier. Un revers qui pourrait retarder le programme spatial américain.

Plus que de simples incursions sur l'astre, les missions lunaires développées à travers le monde visent à prendre pied de façon durable sur notre satellite. La Nasa se concentre ainsi sur la construction d'une station

spatiale en orbite lunaire – le *Lunar Orbital Platform-Gateway* –, en collaboration avec les agences spatiales européenne, canadienne et japonaise. Le complexe, qui comprendra un laboratoire de recherche, sera mis en orbite autour de la Lune pour héberger temporairement et épauler les astronautes et leurs expéditions scientifiques. Elle servira également de base pour des rovers lunaires télécommandés et d'autres engins spatiaux robotisés assistés par l'homme. Les Chinois multiplient quant à eux les missions en préparation de ce qu'ils espèrent être leur future grande première : une base scientifique installée sur la Lune.

Au-delà de l'exploration de notre satellite, c'est aussi la question de l'exploitation possible de ses ressources qui se pose désormais. Des décennies de collecte d'échantillons et d'analyses de la structure de l'astre ont montré que la Lune recèle d'importantes richesses qui



Des chercheurs étudient les possibilités d'utiliser des matériaux lunaires pour construire à l'aide d'imprimantes 3D une base sur la Lune.

Des fusées qui changent la donne

La dernière fois que la Nasa a envoyé des humains sur la Lune, elle a utilisé la fusée *Saturn V*, un lanceur à usage unique. Les trois étages de la fusée ont pu lancer jusqu'à 50 t de matériel sur l'astre. Mais une fois la mission de l'engin remplie, les deux premiers étages de celui-ci ont brûlé dans l'atmosphère, et une partie du matériel a été envoyé dans l'espace ou dans l'océan. Aujourd'hui, des entreprises telles que SpaceX et Blue Origin développent des systèmes de fusées réutilisables pour réduire les coûts.





Plusieurs entreprises privées travaillent sur des missions lunaires avec équipage, telle l'entreprise SpaceX d'Elon Musk avec *Starship*, comme illustré ci-dessus.

pourraient être mises à profit par les futures missions. Parmi elles, les chercheurs ont ainsi trouvé des indices d'un type d'hélium gazeux qu'ils pensent pouvoir utiliser comme source d'énergie nucléaire propre.

Surtout, la Lune a cessé d'être un objectif tel qu'il l'était dans les années 1960 et 1970, pour devenir une étape, une « répétition générale » selon les mots de l'astronome français Thomas Pesquet, avant des missions bien plus ambitieuses et plus lointaines, à commencer par l'exploration de Mars.

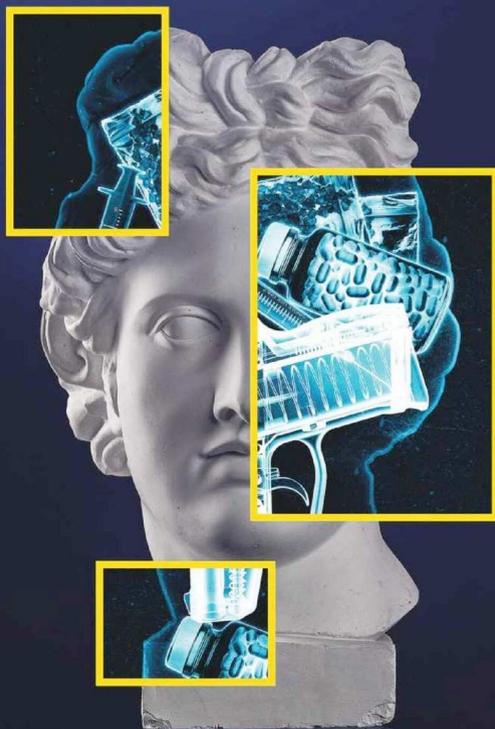
Deux générations se sont écoulées depuis que nous avons vu l'homme poser le pied sur un tout autre monde. Et pour ceux qui ont assisté à l'atterrissage d'*Apollo*, rivés à leur télévision, stupéfaits par ce qu'ils voyaient, ce fut une expérience édifiante de voir jusqu'où le génie humain peut nous conduire. Les planétologues d'aujourd'hui aspirent à vivre un moment semblable. Et à inspirer de nouvelles générations de chercheurs et d'explorateurs de l'espace qui, juchés sur les épaules des géants qui les ont précédés, s'élanceront vers la Lune et bien au-delà. ■

Une mine de ressources

La Lune renferme nombre de richesses : les cratères ombragés en permanence contiennent de la glace d'eau, qui pourrait être extraite et transformée en eau potable ou décomposée pour obtenir de l'oxygène respirable et même du carburant pour fusée. Les scientifiques savent également que plusieurs éléments lourds utilisés dans l'industrie électronique sont présents dans les roches lunaires.



DE LA MARCHANDISE ILLÉGALE DANS UNE CARGAISON DE BANANES ? UN CAMION RÉFRIGÉRATEUR ?
REGARDEZ LA SÉRIE ULTIMATE AIRPORT USA POUR LE SAVOIR !



ULTIMATE AIRPORT USA

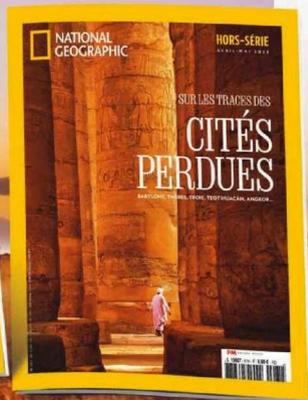
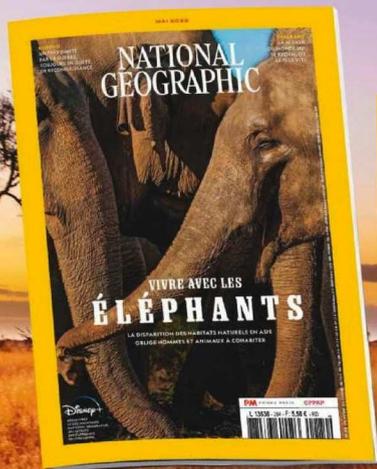
TOUS LES MARDIS 21.00

 NATIONAL
GEOGRAPHIC

DISPONIBLE AVEC
CANAL+
CANAL 115

ABONNEZ-VOUS À

NATIONAL GEOGRAPHIC



5 MOIS OFFERTS

soit 36% d'économie

12 NUMÉROS/AN



6 HORS-SÉRIE/AN

BULLETIN D'ABONNEMENT À NATIONAL GEOGRAPHIC

OFFRE ANNUELLE
12 N° et 6 HS⁽¹⁾

79€
par an au lieu de 123,70€

5 MOIS OFFERTS

Mon abonnement annuel sera renouvelé à date anniversaire sauf résiliation de ma part

@ JE RETROUVE MON OFFRE EN LIGNE

Directement sur :

www.prismashop.fr/HNGSNN79

☎ PAR TÉLÉPHONE

0 808 809 063

Service gratuit
+ prix appel

✉ JE PEUX AUSSI PAYER PAR COURRIER

Je renseigne mes coordonnées M^{me} M.

Nom* :

Prénom* :

Adresse* :

CP* : [][][][][]

Ville* :

Je joins un chèque à l'ordre de National Geographic à renvoyer sous enveloppe affranchie à :

National Geographic - Service Abonnement - 62066 ARRAS CEDEX 9

*Informations obligatoires, à défaut votre abonnement ne pourra être mis en ligne. (1) Abonnement annuel automatiquement reconduit à date anniversaire. Le Client peut ne pas reconduire l'abonnement à chaque anniversaire. PRISMA MEDIA informera le Client par écrit dans un délai de 3 à 1 mois avant chaque échéance de la faculté de résilier son abonnement à la date indiquée, avec un préavis avant la date de renouvellement. A défaut, l'abonnement à durée déterminée sera renouvelé pour une durée identique. Délai de livraison du 1er numéro, 8 semaines environ après enregistrement du règlement dans la limite des stocks disponibles. Les informations recueillies font l'objet d'un traitement informatique par PRISMA MEDIA à des fins de gestion des abonnements, fidélisation, études statistiques et prospection commerciale. Conformément à la loi informatique et libertés du 6 janvier 1978 modifiée, vous pouvez consulter les mentions légales concernant vos droits sur les CGV de prismashop.fr ou par email à dp@prismamedia.com. Offre réservée aux nouveaux abonnés de France métropolitaine. Photos non contractuelles. Les archives numériques sont accessibles durant la totalité de votre abonnement.



HNGSNN79

Frédéric Vallois, DIRECTEUR DE L'ÉDITION FRANÇAISE
Marie-Amélie Carpio, RÉDACTRICE EN CHEF ADJOINTE
Hélène Verger, CHEFFE DE STUDIO
Emanuela Ascoli, CHEFFE DE LA PHOTO
ET DES ÉVÈNEMENTS
Muriel Bataille, MAQUETTISTE
Bénédicte Nansot, SECRÉTAIRE DE RÉDACTION
Nadège Lucas, COORDINATRICE DE CONTENUS
Bernard Cucchi, TRADUCTEUR

DIRECTEURS GÉNÉRAUX
Pascale Socquet Juglard, Philipp Schmidt
DIRECTEUR DE LICENCE
Emmanuel Kessler
**DIRECTRICE MARKETING
ET BUSINESS DÉVELOPPEMENT**
Dorothee Fluckiger
GLOBAL MARKETING ET BUSINESS MANAGER
Hélène Coïn
GLOBAL MARKETING & BUSINESS OWNER
Juliette Lerouge

DIFFUSION
Directrice de la fabrication et de la vente au numéro
Sylvaine Cortada (01 73 05 64 71)
Manager responsable titre vente au numéro
Ghislaïne Lembergt (01 73 05 56 65)
Directeur marketing client
Laurent Grolée (01 73 05 60 25)

FABRICATION
Stéphane Roussiès, Mélanie Moitié
Imprimé en Pologne
Walstead Central Europe,
ul. Obr. Modlina 11, 30-733 Kraków, Poland
Provenance du papier: Finlande
Taux de fibres recyclées: 0%
Eutrophisation: ptot 0,004 kg/to

Date de création : octobre 1999
Dépôt légal : octobre 2023
ISSN 1297-1715.
Commission paritaire : 1123 K 79161

PUBLICITÉ
Directeur Exécutif PMS
Philipp Schmidt (01 73 05 51 88)
Directrice Exécutive Adjointe PMS
Virginie Lubot (01 73 05 64 48)
Directrice Déléguée
Maria Isabelle de Saint Bauzeu
Lead Marquee
Diane Mazau
Planning Manager
Sandra Missue
Industry Director Automobile
Dominique Bellanger (01 73 05 45 28)
Directrice Déléguée Creative Room
Viviane Rouvier (01 73 05 51 10)
Directeur Délégué Data Room
Jérôme de Lempdes (01 73 05 46 79)
Directeur Délégué Insight Room
Charles Jouvin (01 73 05 53 28)

National Geographic

Pour vous abonner,
c'est simple et facile sur
ngmag.club

Pour tout renseignement
sur votre abonnement
ou pour l'achat d'anciens numéros

SERVICE ABONNEMENTS
62066 Arras Cedex 09

Par téléphone depuis la France

0 808 809 063 Service gratuit
+ prix appel

**Abonnement au magazine
France :**

1 an - 12 numéros : 66€
1 an - 12 numéros + hors-séries : 87€

Licence de
NATIONAL GEOGRAPHIC PARTNERS
Magazine mensuel édité par :
PM PRISMA MEDIA
Siège social : 13, rue Henri-Barbusse,
92624 Gennevilliers Cedex
Éditeur : Prisma Media Société par Actions Simplifiée
au capital de 3 000 000 d'euros d'une durée de 99 ans
ayant pour Présidente Madame Claire Léost.
Son associé unique est
Société d'Investissements et de Gestion 123 - SIG 123 SAS
Directrice de la publication :
CLAIRE LÉOST



La rédaction du magazine n'est pas responsable de la perte ou détérioration des textes ou photographies qui lui sont adressés pour appréciation. La reproduction, même partielle, de tout matériel publié dans le magazine est interdite. Tous les prix indiqués dans les pages sont donnés à titre indicatif.

THE MOON

Liz Kruesi

PRODUCED BY NATIONAL GEOGRAPHIC PARTNERS, LLC
1145 17th Street NW, Washington, DC 20036-4688 U.S.A.

Copyright © 2019 National Geographic Partners, LLC. All rights reserved.

Copyright © 2023 French edition National Geographic Partners, LLC. All rights reserved.

NATIONAL GEOGRAPHIC and Yellow Border Design are trademarks of the National Geographic Society, used under license.

EXPLORATION HAPPENS BECAUSE OF YOU

When you read with us, you help further the work of our scientists, explorers, and educators around the world. To learn more, visit natgeo.com/info

CRÉDITS

Couverture Esa/Nasa-Thomas Pesquet

4-5, Nasa; **6-8**, Esa/Nasa-Thomas Pesquet; **10**, SpaceX; **12-13**, Nasa; **14-15**, cartes du NG; **16-17**, François Gohier/Science Source; **18**, Metropolitan Museum of Art, Edward C. Moore Collection, legs de Edward C. Moore, 1891; **19**, Wild Wonders of Europe/Ruiz/Nature Picture Library/Alamy Stock Photo; **20**, Nasa Goddard; **21**, Nanmas/Alamy Stock Photo; **22 (les deux)**, Max Alexander/Lord Egremont/Science Source; **23**, Jean-Léon Huens/National Geographic Image Collection; **24**, Science & Society Picture Library/Getty Images; **25**, Historia/Rex/Shutterstock; **26**, Larry Landolfi/Science Source; **27**, David A. Hardy/Science Source; **28**, Mark Garlick/Science Source; **29**, Nasa; **30-31** Nasa; **31 (en bas)**, Alan Sirulnikoff/All Canada Photos/Alamy Stock Photo; **32**, Gordon Bell/Shutterstock; **33**, John Finney Photography/Getty Images; **34**, Nasa/Ben Smegelsky; **35 (en haut)**, Orlin Wagner/AP/Shutterstock; **35 (en bas)**, Mark Garlick/Science Source; **36-37**, Nasa/Larc/Bob Nye/PhotoQuest/Getty Images; **38-39**, Nasa/Buzz Aldrin; **40-42**, Nasa; **43 (en haut)**, Nasa/Picture-Alliance/DPA/AP Images; **43 (en bas)-51**, Nasa; **52**, ILC Dover, LP, avec l'aimable autorisation de William Ayrey; **53-57**, Nasa; **58-59**, Popperfoto/Getty Images; **60-61**, Nasa/Kim Shiflett; **62-65**, Nasa; **66**, Nasa/Zuber, M. T. et al. *Nature*, 2012; **67**, Nasa/Northrop Grumman (William Furlong); **68-69**, R. Milliken/S. Li, Brown University; **69 (en bas)**, Nasa/MSFC/Aaron Kingery; **70**, Nasa/JPL/Space Science Institute; **71**, Nasa/Dimitri Gerondidakis; **72**, Esa/J. Huart, CC BY-SA 3.0 IGO (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/igo/legalcode>); **73**, Nasa/JPL; **74**, Nasa; **75 (en haut)**, Nasa; **75 (en bas)**, Esa/Genevieve Porter, CC BY-SA 3.0 IGO (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/igo/legalcode>); **76-77** Dana Berry/National Geographic Image Collection; **78**, Art by Dana Berry; **79**, Nasa/JPL/USG; **80-81**, Dana Berry/National Geographic Image Collection; **82-83**, Nasa et Sarah T. Stewart; **84 (en haut, à gauche)**, Mark Garlick/Science Source; **84 (en haut, à droite)**, David A. Hardy/Science Source; **84 (en bas, à gauche et à droite)**, Mark Garlick/Science Source; **85 (en haut, à gauche et à droite)**, Mark Garlick/Science Source; **85 (en bas, à gauche)**, Dr Juerg Alean/Science Source; **85 (en bas, à droite)**, Nasa; **86-87**, Nasa Ames/Dana Berry; **88**, Monica Schroeder/Science Source; **89**, Nasa; **90**, Nasa Goddard's Scientific Visualization Studio; **91**, Nasa; **92-93**, Nasa/JPL-Caltech; **94**, Nasa; **95**, Hernán Cañellas (fourni par Benjamin Weiss); **96**, Nasa; **97 (en haut)**, Nasa; **97 (en bas)**, Nasa/GSFC/Arizona State University; **98**, Nasa; **99**, Nasa/MSFC; **100**, Nasa; **101 (en haut)**, Nasa/GSFC/Arizona State University; **101 (en bas)**, Robbie Shone/National Geographic Image Collection; **102**, Mark Garlick/Science Photo Library/ Alamy Stock Photo; **103**, François Gohier/Science Source; **104-105**, Nasa; **105 (en bas)**, Stephen & Donna O'Meara/Science Source; **106 (en haut)**, Nasa; **106 (en bas)**, Nasa Scientific Visualization Studio; **107**, Joe Tucciarone/Science Source; **108-109**, SpaceX; **110**, Mark Garlick/Science Source; **111**, Nasa; **112**, Stringer - Imaginechina/AP/Shutterstock; **113 (en haut)**, Lars A. Buchhave/DTU Space, National Space Institute, Danemark; **113 (en bas)**, Nasa Scientific Visualization Studio; **114**, Xinhua/Luo Xiangguang via Getty Images; **115**, Esa/P. Carril; **116-117**, Esa/Foster + Partners; **117 (en bas)**, SpaceX; **118 (en haut)**, SpaceX; **118 (en bas)**, Esa/Foster + Partners; **119** Gary Weathers/Tetra Images/Alamy Stock Photo.

Toute l'équipe du zoo de la Flèche vous attend pour de nouvelles naissances et de nouveaux arrivants. Prêt ?

UNE SAISON AU

ZOO



TOUS LES VENDREDIS 18.20



 NATIONAL
GEOGRAPHIC

WILD

DISPONIBLE AVEC
CANAL+
CANAL 116



SPEEDMASTER MOONWATCH

En juillet 1969, la Speedmaster héritait de son surnom en devenant la première montre portée sur la Lune. En 1970, elle entra dans la légende en aidant l'équipage de la mission Apollo 13 à revenir sur Terre sain et sauf. Rééditée en tant que Co-Axial Master Chronomètre, l'emblématique Moonwatch est désormais testée et certifiée au plus haut niveau par l'Institut fédéral suisse de métrologie (METAS) - ce qui garantit davantage de précision, de fiabilité ainsi qu'une résistance extrême au magnétisme.


OMEGA