

LE LIVRE DE LA LUNE



À LA DÉCOUVERTE DES MYSTÈRES DU MONDE LUNAIRE

Bevan M. FRENCH

Traduction Laurent WEILL

- Quel est l'âge de la Lune ?
De quoi est-elle faite ?
- Comment s'est-elle formée ,
- Y a-t-il de la vie sur la Lune ?

Depuis 1969, douze hommes ont marché sur la Lune et ont posé les fondations de la connaissance des mystères du satellite de la Terre. En moins de dix ans le Programme Apollo a fait passer ce corps céleste de l'état d'objet inconnu et inaccessible à l'état de monde familier. Bevan M. French présente ce monde aux lecteurs terriens tout en racontant ce que l'on pensait de la Lune à l'aube de l'humanité et parcourt l'histoire de l'exploration lunaire et des découvertes scientifiques du Programme Apollo. Il passe en revue les connaissances du système Terre-Lune et suggère que l'exploration lunaire puisse aussi apporter la clé des problèmes que posent l'histoire primitive de la Terre et l'origine même de l'Univers.

LE LIVRE DE LA LUNE

Bevan M. French reçut un diplôme « A.B. degree » de géologie du Dartmouth College en 1958, un M. S. du California Institute of Technology en 1960 et un Ph. D. du Johns Hopkins University en 1964. Cette année là, il entra au Goddard Space Flight Center de la NASA où il resta pendant huit ans, étudiant les anciens cratères terrestres d'origine météoritique. En 1968, il était Professeur (Visiting Professor) à Dartmouth. En 1969, il commença à étudier les roches lunaires rapportées par les missions Apollo 11, 12 et 14. Il fut aussi sélectionné comme membre d'un petit groupe de scientifiques pour étudier le matériau ramené par la sonde automatique russe Luna 16, et en 1971 et 1972, il participa à l'entraînement des astronautes lors de séjours avec les équipages d'Apollo 16 et 17. En 1972, le Docteur French devint Directeur de Programme pour la Géochimie au National Science Foundation, tout en étant le principal administrateur pour la recherche fondamentale dans le domaine des Sciences de la Terre. En 1973, il participa à la découverte d'un ancien cratère d'impact Brésilien de quarante kilomètres de diamètre et datant de 150 000 000 d'années. Il retourna à la NASA en 1975 comme Chef de Programme de la recherche sur les matériaux extraterrestres ; en occupant cette fonction, il administra le programme de recherche sur les échantillons lunaires, les météorites et les poussières cosmiques, pour la NASA. Dr French a publié plus de trente-cinq articles techniques sur les minéraux de fer naturels, les réactions chimiques dans les roches, les cratères terrestres météoritiques et les échantillons lunaires. Il vit avec son épouse à Chevy Chase, dans le Maryland. Ils ont trois enfants et deux petits enfants. Le Docteur French utilise ses loisirs à entretenir son gazon, à composer et jouer des chansons de folk en continuant ses recherches sur les cratères terrestres météoritiques.

Bevan M. FRENCH

LE LIVRE DE LA LUNE

Traduit de l'américain par
Laurent WEILL

Dédié
A ma mère
Madame John S.FRENCH
qui n'a jamais imaginé
partir en voyage pour récolter
des cailloux

Remerciements du traducteur,

- à M. Bevan M. FRENCH, qui m'a adressé son livre dédié et m'a autorisé à le traduire et à en publier la traduction
- à Lionel FOLLET, mon beau-frère, qui a mis en ordre le texte pour qu'il soit présentable à l'impression, et plus facile à relire,
- à Françoise HOURMAT, qui a corrigé la traduction,
- à Evelyne BLOMME, qui a lu la traduction,
- à Pascal KOUAI, informaticien de l'Association Culturelle de Juvisy sur Orge, qui a scanné les illustrations et les photographies,
- au Club d'Astronomie de Juvisy sur Orge, dont l'activité il y a quelques années, a orienté mon intérêt pour la Lune grâce auquel j'ai découvert le livre de Bevan M. French à la médiathèque du Museum d'Histoire Naturelle de Paris,
- et tout spécialement avec son extrême reconnaissance
- à Henri RABILLOUD, pour ses corrections d'une extrême précision .
- et à Monsieur André THIOT, pour sa lecture de la traduction, ses corrections et ses multiples suggestions qui permettent de replacer cet ouvrage dans le contexte de l'état actuel de nos connaissances.
- et à Monsieur DUMAY, qui a corrigé les deux extraits du livre de Hook en vieil anglais du 17^e siècle.

TABLE DES MATIÈRES

Liste des illustrations.....	9
Remerciements.....	13
Chapitre 1 : Les pierres de Lune arrivent	17
Chapitre 2 : La longue veille.....	29
Chapitre 3 : L'origine de la Lune : « Toutes les explications sont improbables ».....	43
Chapitre 4 : Le coup d'œil avant le bond	65
Chapitre 5 : « Ici Base de la Tranquillité » : L'homme sur la Lune.....	89
Chapitre 6 : Anatomie d'une pierre de Lune.....	117
Chapitre 7 : Le régolite.....	141
Chapitre 8 : Du temps et de la Lune.....	67
Chapitre 9 : La surface lunaire : le coup de soleil d'un milliard d'années	187
Chapitre 10 : L'intérieur lunaire : cartographie grâce aux échos.....	217

Chapitre 11 : La Lune et au-delà.....	245
Appendice I : Chronologie des missions Apollo habitées.....	271
Appendice 2 : Les grands moments des traversées Apollo habitées	272
Les grands moments des vols habités Apollo	
Bibliographie.....	275
Index.....	277

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Photographies, p. 116 et suivantes

- 1) Une roche de Lune au « Laboratoire de Réception Lunaire».
- 2) Une vue télescopique du cratère Copernic depuis la Terre.
- 3) Vue télescopique depuis la Terre du cratère Platon rempli de lave.
- 4) Rainures sinueuses près du cratère Prinz sur une photographie du Lunar Orbiter.
- 5) Carte géologique montrant différentes formations rocheuses sur le site d'Apollo 15.
- 6) Vue de l'intérieur du cratère Copernic depuis le Lunar Orbiter.
- 7) Le cratère Tsiolkovsky rempli de lave sombre sur la face cachée de la Lune, depuis Lunar Orbiter.
- 8) Le panorama des collines Marius, un possible champ lunaire de volcans.
- 9) L'astronaute d'Apollo 11 Eldwin Aldrin plante le « store » pour piéger des particules de vent solaire.
- 10) Carte des sites d'alunissages d'Apollo.
- 11) Un bloc de brèche « blanche et noire » de la Formation Fra Mauro, photographié par les astronautes d'Apollo 14.
- 12) Vue de la Terre photographiée depuis la Lune avec un appareil à ultraviolet par les astronautes d'Apollo 15.
- 13) Vue conventionnelle de la Terre en lumière naturelle, photographiée près de la Lune par les astronautes d'Apollo 8.
- 14) Panorama du Cratère « North Ray », photographié par les astronautes d'Apollo 16 sur le site d'alunissage Descartes.
- 15) Harrison Schmitt, astronaute d'Apollo 17, regardant un énorme bloc de pierre dans la Vallée Littrow
- 16) Très fines gouttelettes de verre dans le Sol Orange récolté par les astronautes d'Apollo 17.
- 17) Mesure de la Lune à 100 kilomètres d'altitude, par le module de commande d'Apollo 17.
- 18) Vue microscopique d'une lame mince de lave basaltique d'Apollo 11, montrant les différents minéraux qui la composent.
- 19) Très fines gouttelettes de verre gelé piégées dans un cristal de basalte d'Apollo 11.
- 20) Une microbrèche lunaire contenant des fragments de verre et de roche brisée, récoltée par les astronautes d'Apollo 11.
- 21) Une brèche lunaire compacte, dense, contenant des morceaux de différentes roches dans une matrice anciennement fondue, récoltée par les astronautes d'Apollo 16.
- 22) Cristaux du minéral « apatite » formés à partir de vapeur chaude dans les cavités d'une brèche

d'Apollo 14.

23) Gouttelette de verre anciennement fondu, formée par un impact de météorite sur la surface lunaire.

24) Photographie aérienne du Cratère « Meteor » en Arizona, cratère terrestre formé par l'impact d'une grande météorite.

25) Vue microscopique de brèche mélangée à du verre, formée par un impact de météorite sur la Terre, récoltée dans un grand cratère d'impact au Canada.

26) Microcratères sur la surface exposée d'une roche lunaire (échantillon 60015) récoltée sur le site d'alunissage Descartes d'Apollo 16.

27) Microcratères minuscules formés par les impacts de la poussière cosmique sur une petite perle de verre récoltée dans le régolite.

28) Photographie d'un très petit fragment du matériau « KREEP » qui constitue le « composant magique » radioactif du régolite.

29) Traînées de particules atomiques à haute énergie d'origine spatiale qui traversèrent des pièces en plastique transportées lors de la mission Apollo 14.

30) Un basalte lunaire poreux contenant de nombreuses bulles qui étaient remplies de gaz lors de la fusion des roches, collecté par les astronautes d'Apollo 15.

31) Vue en « rase-mottes » du cratère Tsiolkovsky prise par les astronautes d'Apollo 17.

32) Vue de la Lune prise par les astronautes d'Apollo 16 montrant une grande partie de la face cachée invisible depuis la Terre.

33) Vue rapprochée de Mercure depuis la sonde automatique Mariner 10.

34) Olympus Mons, un volcan géant sur Mars, photographié par Mariner 9.

35) Vue de la Terre montrant une grande partie de l'Afrique, prise lors du retour des astronautes d'Apollo 17.

36) L'astronaute Eugene Cernan d'Apollo 17 debout à la fin de l'exploration de la Vallée « Littrow » .

Illustrations

A) Phases et éclipses de la Lune.....	47
B) L'ensemble des appareils d'expérience de bombardement par particules α de Surveyor, le premier instrument pour explorer la surface d'un autre monde.....	80
C) Équipement et scaphandre utilisés pour l'exploration scientifique de la surface lunaire.....	99
D) Schéma de l'appareil de mesure de flux thermique pour déterminer la température interne de la Lune.....	104
E) L'instrument de la sonde électronique utilisée pour analyser les échantillons lunaires ramenés sur Terre.....	121
F) Stades de l'excavation rapide d'un cratère d'impact par une météorite.....	153
G) Formation et évolution du régolite sous l'effet des impacts continus de météorites. .	159
H) Enregistrement d'un séisme lunaire montrant la réverbération prolongée sur la Lune.....	227
I) Comparaison des structures internes de la Lune et de la Terre.....	231
J) Coupe de la Lune montrant notre conception actuelle de sa forme et de sa structure.....	235

(p. 13 et 14)

REMERCIEMENTS

Bien que des hommes se soient posés sur la Lune depuis déjà presque huit ans, l'étude des échantillons lunaires et l'analyse des données rapportées par les instruments sur la Lune sont encore un sujet scientifique d'actualité en pleine expansion. Les résultats scientifiques publiés comportent plus de 5000 articles techniques et occupent des mètres de rayons de bibliothèque. Condenser ce flot de documents en un livre unique, résumer les découvertes scientifiques majeures, et présenter l'information d'une manière lisible, aurait été impossible sans l'aide de nombreuses personnes, qu'elles fassent partie ou non du Programme Apollo.

De nombreux scientifiques, acteurs du programme de recherche lunaire ne furent avares ni de leur temps ni de leurs conseils. Je suis particulièrement reconnaissant à tous ceux qui ont fourni les photographies : E. C. T. Chao, U. S. Clanton, R. L. Fleischer, B. P. Glass, S. E. Haggerty, O. B. James, D. S. Mc Kay, E. L. Roedder, G. Simmons, N Toksoz, R. M. Walker, et D. F. Weill. Je regrette que nous n'ayons pas pu utiliser tout le travail d'art qui fut offert. John S. Shelton a eu l'amabilité de donner la photographie du Cratère « Meteor » dans l'état d'Arizona, tirée de son livre « Géologie illustrée », que l'on trouvera sous le numéro 24 de ce livre. D'autres illustrations furent fournies par de nombreuses personnes dévouées de « NASA Headquarters Office of Public Affairs », à Washington, D. C., particulièrement A. L. Gaver, et au National Space Science Data Center de Greenbelt, Maryland, le Dr. W. S. Cameron qui aida à retrouver plusieurs belles photographies lunaires.

Le manuscrit n'aurait pas pu être mis en état sans la dactylographie soignée d'Alice Mc Kinney et le travail photographique de Lois Hazell. L'excellent article de George W. Wetherhill (Science, vol. 173, 20 juillet 1971, pp. 383-92) a fourni le titre du chapitre 8.

Le texte final doit beaucoup aux soins et à la ténacité de plusieurs lecteurs : William et Kathleen Childs, Sharon Childs Moore, John A. O'Keefe, Ed et Kathleen Roeder, et Paul Lowman. S'ajoute l'effort de Suzan Zuckerman aux Editions « Penguin Books » qui a contribué à faire un livre plus court, plus concis et (je dois l'admettre) meilleur. Une reconnaissance particulière est due à Mary Hill French, qui assumait brillamment les fonctions conflictuelles de collègue, éditrice et épouse depuis 1972, quand ce livre a commencé à prendre forme.

Nous tous qui avons été impliqués dans le Programme Apollo, devons beaucoup au Peuple Américain. Son intérêt, sa curiosité, son enthousiasme et ses encouragements rendirent possibles les découvertes que j'ai décrites ici. En un sens, les découvertes du Programme Apollo sont ses découvertes. Voici son livre.

Bevan M. French

Chevy Chase, Maryland

LE LIVRE DE LA LUNE

CHAPITRE UN

LES PIERRES DE LUNE ARRIVENT

Vers la fin de l'été 1969, quelques personnes firent quelque chose qu'aucun homme au cours de l'histoire n'avait encore jamais fait auparavant : tenir un peu de la Lune dans leurs mains.

Pour toute l'humanité, la date importante fut le 20 juillet 1969, quand Neil Armstrong et Edwin Aldrin posèrent leur Module spatial *Eagle* sur la Lune. La télévision permit à un demi milliard de personnes de voir les astronautes planter le drapeau américain sur la Lune, marcher sur la surface de la Lune, mettre en oeuvre des instruments, et ramasser des roches.

Parmi les spectateurs, il y avait plusieurs centaines d'hommes et de femmes particulièrement intéressés : les scientifiques qui se préparaient avec impatience à l'étude des pierres de Lune. Pour eux, la date importante fut le 25 juillet quand, vers midi, deux boîtes contenant les échantillons d'Apollo 11 furent livrées en parfait état au Laboratoire de Réception Lunaire au Centre des Missions Spatiales habitées de la NASA, à Houston, dans l'état du Texas.

Les 21,7 kg d'échantillons lunaires devinrent bientôt le centre d'un programme de recherches et d'analyses (**page 18**) qui fut unique dans l'histoire de la science. Pendant les huit années précédentes, alors que des centaines de milliers de personnes avaient travaillé pour envoyer des hommes sur la Lune et pour les ramener sains et saufs, des centaines d'autres planifiaient comment les échantillons seraient stockés, conservés et analysés. Une équipe de « Première Estimation » d'environ 50 scientifiques avait été sélectionnée pour conduire les premières brèves études, après quoi des échantillons seraient distribués à environ 150 groupes de Chercheurs Principaux soigneusement choisis et leurs collaborateurs. Ces scientifiques analyseraient les pierres de Lune en utilisant toute méthode déjà appliquée ou en passe de l'être à des roches terrestres, obtenant des informations qui pourraient éclaircir l'origine et l'histoire de la Lune tout comme de précédentes études nous avaient aidé à comprendre l'évolution de notre propre planète.

Le 25 juillet 1969, le travail commença. Les échantillons furent stockés dans d'énormes chambres à vide. Les chimistes et géologues de l'équipe de « Première Estimation » se pressèrent tout autour avec leurs appareils photographiques lorsque les caisses scellées furent ouvertes. Tout ce qui fut visible au premier abord fut la poussière noire informe qui recouvrait les pierres ainsi que les sacs d'échantillons. Puis les échantillons furent dépoussiérés, examinés à travers les vitres de verre épais, sondés et décrits (photo 1). De petits morceaux furent coupés afin de réaliser une observation microscopique et une analyse chimique. Alors que la distribution d'échantillons commençait pour les Chercheurs Principaux, excitation et curiosité à propos des roches lunaires grandissaient et se répandaient. En effet, le monde regardait par dessus l'épaule des scientifiques pour voir ce que les roches révéleraient sur la nature de la Lune.

Les scientifiques eux-mêmes ne savaient pas à quoi s'attendre. Depuis les temps préhistoriques, l'Homme avait regardé la Lune et s'était demandé ce qu'elle faisait là. Juste avant les missions Apollo, les véhicules spatiaux Ranger et Orbiter avaient envoyé des dizaines de milliers de vues rapprochées de la Lune. Les missions Surveyor avaient déjà creusé dans les éboulis lunaires et en avaient fait l'analyse chimique. Mais malgré tous ces efforts, personne ne pouvait être sûr (**page 19**) de ce que contenaient réellement les boîtes d'échantillons encore fermées.

Ce mélange de curiosité et d'incertitude n'avait rien de nouveau dans l'histoire de l'Homme. Les alunissages étaient seulement le dernier épisode dans la tentative permanente de l'Homme de répondre aux questions qu'il se pose sur lui-même et sur son environnement : l'Homme est-il unique dans l'Univers ? Est-il seul ? Quel sorte d'Univers habite-t-il ? Comment cet Univers s'est-il formé ? Quel est son passé ? Quel est son avenir ? La preuve d'un Créateur existe-t-elle ?

Depuis le début des temps, l'Homme a abordé ces questions avec toutes ses capacités techniques et mentales. Art, littérature, religion et philosophie se sont toujours préoccupés de ces problèmes. La science depuis ses balbutiements il y a 3 000 ans jusqu'à son accélération au cours des trois derniers siècles, a fourni à l'Homme de plus en plus d'informations sur la nature de son environnement. Plus la connaissance scientifique augmentait, plus l'Homme se posait de questions précises et se forgeait une nouvelle confiance dans la possibilité de trouver des réponses à de telles questions : Comment et quand la Terre et le système solaire se sont-ils formés ? A quoi ressemblent les autres planètes ? Ont-elles de la vie ? Quelles sont les différences entre la Terre et la Lune ? Se sont-elles formées de différentes manières ? La Terre ressemblait-elle à la Lune au moment de sa formation ? Comment a-t-elle évolué ? La Lune a-t-elle jamais eu une atmosphère et de la vie comme la Terre ?

Au départ, le progrès dans les réponses à ces questions fut lent. La raison principale était que la Terre étant accessible et la Lune et les planètes étant inaccessibles, elles étaient étudiées par deux groupes séparés de scientifiques. L'étude de la Terre a été le royaume de la géologie, et des géologues ont pu étudier (**page 20**) les roches terrestres et décrypter leur histoire sans aucune référence aux autres planètes. Les astronomes, de leur côté, regardaient au delà de la Terre au lieu de regarder en son sein, observant les étoiles et les planètes à travers l'atmosphère brouillée et changeante de la Terre, pensant en général que la Terre ne peut être qu'une base sur laquelle ils construisent toujours de plus gros télescopes. Mais quelle que soit la manière dont les plus gros télescopes grossissaient les planètes, ils n'étaient pas assez puissants pour voir à quoi elles ressemblaient vraiment.

En outre, l'astronomie est une des plus vieilles sciences alors que l'étude scientifique de la Terre ne date que d'un peu plus d'un siècle. La grande révolution scientifique entre 1500 et 1700, impulsée par les travaux de Copernic, Brahé, Kepler, Galilée et Newton, avait fermement établi la nature et les mécanismes de base du système solaire. Il fallut deux autres siècles avant que des scientifiques spécialisés dans l'étude de la Terre entreprennent une révolution semblable pour comprendre notre planète. Il fallut attendre le 20^{ème} siècle pour que les scientifiques développent les outils et acquièrent la perspicacité suffisante permettant de démontrer que la Terre est un monde ancien, changeant continuellement depuis sa formation il y a 4 milliards et demi d'années, et qu'à partir de ce moment-là, elle a été modelée par le vent, l'eau, les éruptions volcaniques et la formation des montagnes.

Mais pendant longtemps, l'origine et l'histoire primitive de la Terre restèrent un mystère. La preuve a été apportée par les météorites que le système solaire et a fortiori la Terre se formèrent il y a 4,5 à 4,7 milliards d'années, alors qu'aucune roche âgée de plus de 3,5 milliards d'années n'a été trouvée à la surface de la Terre¹.

Le premier quart de l'histoire de la Terre nous manque. Les roches qui existaient entre 4,5 et 3,5 milliards d'années ont été érodées par le vent et l'eau ou ont été absorbées lors d'anciens épisodes volcaniques et de surrections de montagnes. **(page 21)** La destruction de ces anciennes roches a fait disparaître la trace du mode de formation de la Terre, du mode de formation des volcans, du mode de formation d'un noyau de fer et d'un champ magnétique, du mode de formation des océans et d'une atmosphère, et fait le plus important, du mode de formation de la vie. Alors que s'ouvrait l'ère de l'exploration de l'espace, les géologues se trouvaient dans la position d'un détective amené à reconstituer l'enfance d'un homme en n'ayant des informations que sur sa vie d'adulte.

En juillet 1969, les roches lunaires ramenées réunirent les géologues et les astronomes. La Lune fut placée sous un microscope à travers lequel les géologues purent étudier ses roches avec le même intérêt qu'ils ont porté à l'étude des roches terrestres. Les astronomes, pendant ce temps, attendaient de voir ce que l'étude directe de la Lune pouvait apporter sur l'origine du système solaire, alors que les géologues espéraient que, dans les roches de la base de la Tranquillité, pourraient se trouver les clés du chaînon manquant de l'enfance de la Terre.

Même après toute la préparation et l'attente que le Programme Apollo avaient suscitées, le contact physique réel avec la Lune semblait produire une sensation d'irréalité pour tous, scientifiques comme profanes. « Et pourquoi pas la Lune pendant que vous y êtes ? » était autrefois, l'expression du comble de l'impossible. Dorénavant le sens de cette expression avait complètement changé ; la Lune était devenue soudain quelque chose qui pouvait tenir dans la paume d'une main, qui pouvait être pesée et analysée. Le changement demanda quelque temps pour que l'on s'y habitue.

J'ai tenu pour la première fois un échantillon lunaire à la fin de septembre 1969. Je rendais visite à un collègue, le Professeur Malcom Brown, à l'université de Durham en Angleterre, quelques jours après l'arrivée des premiers échantillons d'Apollo 11 qui lui étaient destinés. Durham est une vieille ville intéressante avec une cathédrale du 11^{ème} siècle, et je fus frappé par le contraste entre les constructions anciennes de la ville et le coffre-fort moderne tout récemment installé dans le bureau du Professeur Brown. Ouvrant le coffre, il en sortit avec soin une fiole de verre de la taille de mon petit doigt environ, et me la tendit. Je la pris machinalement. **(page 22)** Elle contenait à peu près l'équivalent d'une cuillerée à thé de quelque chose qui ressemblait à du sable noir grossier. Quand je réalisai pour la première fois que j'étais en train de tenir un morceau de la Lune, ma réaction fut : « ce n'est pas possible ». Par la suite, après avoir travaillé sur de nombreux autres échantillons venant de différentes parties de la Lune, je finis par m'y habituer, mais cette impression initiale d'irréalité merveilleuse ne disparut jamais entièrement.

1. En 1971, alors que l'étude des échantillons lunaires en était à son point culminant, un groupe de scientifiques de l'Université d'Oxford, en Angleterre, signalait la découverte de roches âgées de près de 3,8 milliards d'années à l'ouest du Groenland.

Le contenu de la fiole avait la couleur de charbon écrasé et semblait trop sombre pour être venu de la Lune. Mais c'était à cela que devait ressembler la Lune vue de très près. Longtemps avant Apollo nous savions que la Lune, malgré son éclat dans le ciel nocturne, a un très mauvais pouvoir réfléchissant, ne renvoyant en effet que 7% de la lumière solaire qui l'atteint. Je savais que la surface de la Lune devait être de cette couleur, mais il paraissait malgré tout étrange de rapporter une telle substance noire d'un tel objet brillant.

La curiosité triompha de l'émotion ou du sentiment de crainte, et je fis tourner la fiole dans ma main pour en examiner le contenu, produisant un tintement clair et léger lorsque les fragments roulaient contre le verre ; la masse noire de la fiole se répartit en différents fragments de la taille d'un petit pois à une tête d'épingle. Avec une loupe, je reconnus différentes sortes de fragments. Il y avait de petites particules de roche dense au sein desquelles luisaient de fins cristaux. D'autres fragments avaient un aspect poreux et métallique, avec des arêtes aiguës et de petites cavités ouvertes ; leur aspect faisait penser qu'elles avaient été chauffées jusqu'à la limite de la fusion et du bouillonnement. Je pus voir aussi quelques billes de verre brillantes que j'identifiai comme étant les « perles de verre » dont j'avais appris l'existence par le journal.

Le premier échantillon lunaire que j'examinai n'était pas une simple roche, mais un mélange complexe de fragments écrasés et fondus. La fiole contenait du « régolite » (voir chapitre 7) venant de la couche de débris fondus et réduits en éclats qui recouvre la surface de la Mer de la Tranquillité. La majeure partie des 22 kilogrammes d'échantillons rapportés par Apollo 11 consistait (**page 23**) en ce matériau fragmenté complexe ; les 20 plus grandes pierres collectées étaient encore en cours d'étude à Houston ².

Avant même que je tiens la bouteille de régolite à Durham, des scientifiques avaient déjà commencé à analyser des échantillons avec des instruments autrement plus sensibles que l'œil et l'oreille humains. L'étude de la Lune avait soudain pris une nouvelle dimension, depuis que l'acquisition de roches réelles à analyser rendait possible, pour la première fois, de fouiller directement le passé de la Lune.

« Les roches se souviennent » constatait un célèbre géologue, signifiant que leur structure, leurs minéraux et même l'arrangement de leurs atomes, conservaient la trace de leur formation et de leur changement depuis des millions d'années. Mais lire cette trace conservée demande à la fois une grande perspicacité et d'excellents instruments, et c'est seulement depuis les 50 dernières années que notre connaissance et notre technologie ont atteint un niveau permettant d'établir une image assez claire de l'histoire de notre planète. Maintenant ces possibilités étaient appliquées aux roches lunaires, et l'information commençait à se faire jour non pas au bout de plusieurs années mais en un laps de temps se comptant en jours et semaines.

Le 15 septembre 1969, deux mois seulement après le lancement d'Apollo11 vers la Lune, une conférence de presse se tint à Washington, pour présenter l'information apportée par les roches lunaires. Les résultats de ce long et intense effort de planification et d'analyse pouvaient vraiment étonner tous ceux qui sont habitués à une plus grande retenue de la recherche scientifique d'une autre

2. NDT : à la date d'écriture du livre en 1977.

époque. En deux mois seulement, grâce à de minuscules quantités de matériau rassemblées à partir d'un seul endroit de la Lune (un site de la Mer de la Tranquillité) des scientifiques furent capables de résoudre pour toujours de nombreuses questions essentielles sur l'histoire et l'origine de la Lune :

1) Les roches de la Mer de la Tranquillité sont du basalte, une roche formée par le refroidissement de lave fondue. Cette découverte révélait que la Lune fut un jour assez chaude pour fondre à l'intérieur. Donc, nous savons que la Lune ne peut plus être considérée (**page 24**) comme un objet froid, primitif, immuable. C'est un corps planétaire singulier ayant sa propre histoire.

2) Les laves basaltiques de la Mer de la Tranquillité firent irruption pour s'écouler sur la surface lunaire il y a environ 3,7 milliards d'années et sont restées inchangées depuis. A partir de là, nous en avons déduit que la Lune est au moins âgée de 3,7 milliards d'années et peut-être même plus.

3) Les basaltes lunaires sont semblables aux laves basaltiques trouvées sur Terre dans des endroits comme Hawaïi, l'Islande et le Colombia River Plateau au nord-ouest des États Unis. Les laves lunaires et terrestres contiennent les mêmes éléments chimiques, principalement de la silice, de l'aluminium et de l'oxygène. Environ 95% des basaltes terrestres et lunaires sont constitués des mêmes minéraux. Donc la Lune semble avoir une composition chimique assez proche de celle de la Terre.

4) Mais à bien des égards, basaltes lunaires et terrestres diffèrent nettement. Les basaltes lunaires ne contiennent pas d'eau (même les basaltes de la Terre les plus récents contiennent un petit pourcentage d'eau). En raison de cette absence d'eau, les minéraux des basaltes lunaires sont frais et ne montrent aucune transformation en argiles ou en oxydes de fer, ce qui se produit toujours dans les roches terrestres. De plus les basaltes lunaires contiennent plus de titane (environ 10 %) que les basaltes terrestres (environ 2 %). Les basaltes lunaires contiennent du fer métallique ainsi que certains nouveaux minéraux jamais retrouvés dans des roches terrestres.

5) Le socle rocheux compact, sur le site d'alunissage d'Apollo 11 est recouvert d'une couche de régolite de quelques mètres d'épaisseur, composé de fragments de roches brisées et fondues. Presque tous sont des fragments de basalte issus du socle rocheux sous-jacent. Cette couche s'est formée graduellement par le bombardement continu de météorites sur la surface lunaire pendant des milliards d'années.

6) Il y a quelques fragments de roche blanche inhabituelle dans le régolite qui sont nettement différents des morceaux de basalte plus souvent rencontrés. Des fragments aussi rares peuvent avoir été projetés à partir de régions montagneuses éloignées par des impacts de météorites. S'il en est ainsi, alors les régions montagneuses de la Lune de couleur claire et (**page 25**) les « mers » lunaires sombres doivent être composées de roches de différentes sortes.

7) Malgré un grand effort pour trouver une preuve d'une vie lunaire passée ou présente, aucun fossile, microbe ou composé chimique organique ne fut trouvé dans les échantillons examinés. La Lune est « morte » et n'a, apparemment, jamais hébergé d'êtres vivants. Biologistes aussi bien que romanciers furent déçus, mais ces résultats furent tout de même importants. Nous savons maintenant que la vie ne se forme pas partout et qu'elle ne peut pas se former dans n'importe quel environnement tel que celui présent sur la Lune.

Tandis que chaque nouvelle bribe d'information prenait naissance à partir des roches lunaires, de longues années de discussions prenaient fin. De nombreuses théories anciennes et défendues avec fermeté devenaient caduques et de nouvelles apparaissaient à leurs places. Certaines parmi les nouvelles théories ne durèrent que jusqu'en novembre 1969 quand Apollo 12 revint avec des roches de l'Océan des Tempêtes.

Les roches d'Apollo 12 étaient aussi des laves basaltiques. Comme il s'est avéré que deux « mers » lunaires étaient faites de ce matériau, il semblait maintenant probable que toutes les zones sombres de la Lune étaient du basalte. Mais les roches d'Apollo 12 de l'Océan des Tempêtes n'étaient pas les mêmes que celles ramenées par Apollo 11 de la Mer de la Tranquillité. Tout d'abord, elles étaient âgées d'environ 3,3 milliards d'années, soit environ un demi milliard d'années plus jeunes que les échantillons d'Apollo 11. Leur composition chimique était aussi différente ; elles contenaient moins de titane (environ 5 pour cent) que les basaltes d'Apollo 11 (10 %), mais plus encore que les basaltes terrestres (2%).

Des théories lunaires ont dû être encore modifiées pour expliquer ces différences. L'idée d'une Lune chaude partiellement fondue a dû être développée pour comprendre au moins deux périodes différentes de fusion, ou peut-être à la place, une longue période de réchauffement suivie d'un écoulement de lave qui dura un demi milliard d'années. Les différences chimiques entre les laves d'Apollo 11 et 12 montraient que la composition de l'intérieur de la Lune changeait d'un endroit à un autre. Les deux lots de lave lunaire étaient venus, pour ainsi dire, de différents creusets. La Lune « d'après Apollo12 » était devenue **(page 26)** brusquement plus complexe qu'elle n'était apparue après la première mission Apollo. Cela devait continuer ainsi.

Alors que les missions Apollo continuaient, les résultats scientifiques arrivaient à un tel rythme qu'il était difficile de les suivre. Les premiers alunissages avaient établi que le système Apollo fonctionnait, permettant aux missions suivantes de se consacrer à de plus ambitieuses expéditions et à une grande charge utile scientifique. Les mers lunaires plates furent abandonnées au profit de sites plus accidentés et plus intéressants scientifiquement. Des caméras de télévision perfectionnées rapportèrent sur Terre des images de promeneurs lunaires en fauteuil vers la tranchée profonde du Sillon Hadley et vers les pentes escarpées entourant la Vallée Littrow. Les courtes marches lunaires d'Apollo 11 et 12 furent suivies de longs parcours en Rover Lunaire. Des échantillons revinrent sur Terre par lots de centaines de kilos. De plus grosses roches furent ramenées et de longs fragments de carottage furent extraits du régolite pour échantillonner ses couches et pour les rapporter sur Terre, intacts.

Alors que chaque duo d'astronautes travaillait sur la Lune, un troisième, tournant en orbite à plus de 150 kilomètres au dessus d'eux dans le Module de Commande Apollo ³, pointait des instruments qui

3. L'engin spatial Apollo comporte deux parties, un module lunaire (LM ou LEM) dans lequel deux astronautes se posent sur la Lune, et un module de Commande (CM) dans lequel un troisième astronaute reste en orbite autour de la Lune. A la fin de l'exploration de la surface, le LM est propulsé hors de la Lune et rejoint le CM en orbite lunaire. Les astronautes passent avec leurs échantillons, du LM au CM, le LM est ensuite abandonné et les trois astronautes reviennent sur terre dans le CM.

photographiaient et analysaient de larges bandes de la surface lunaire. Et chaque fois que les astronautes, propulsés par leur fusée, quittaient la Lune, ils laissaient derrière eux des instruments qui, même actuellement⁴, continuent de renvoyer sur Terre toujours plus de données récentes sur les vibrations, la chaleur et le champ magnétique de la Lune.

De petites parties de la Lune, invisibles aux télescopes, devinrent des lieux de récolte de roches lunaires, et des scientifiques créèrent une nouvelle géographie lunaire en utilisant des noms familiers et (**page 27**) malicieux : le bonhomme de neige, le cratère Cône, l'Éperon d'argent, la Montagne enfumée, le Toboggan, le Cratère Court. Certains des échantillons parmi les plus caractéristiques eurent droit aussi à un nom, et, scientifiques et journalistes présentèrent chacun leurs propres versions de l'information « muette » contenue dans « Grosse Bertha », la « Roche de la Genèse », « Maison Rocheuse » et le « Sol Orange ».

Pendant les quelques années fiévreuses qui suivirent la mission Apollo 11, nous avons appris plus sur la Lune que pendant tous les siècles précédents. La récolte d'échantillons cessa en décembre 1972, avec Apollo 17, mais l'étude des roches ramenées se poursuit, et de nouvelles données sur ces dernières, sont comparées avec les informations venant encore des instruments installés sur la Lune. Il nous fallut un peu moins de dix ans pour réaliser les missions Apollo et atteindre la Lune. Il faudra beaucoup plus de temps avant de comprendre tout ce que nous y trouvâmes.

Il reste beaucoup plus à apprendre de la Lune dans l'avenir mais dès maintenant beaucoup de choses sont claires. Nous savons désormais que la Lune se forma en même temps que la Terre et que le reste du système solaire, il y a environ 4 milliards et demi d'années. Du point de vue de la composition chimique, la Lune ressemble à la Terre, mais il y a tout de même beaucoup de différences chimiques, d'où la difficulté de prétendre que la Lune et la Terre furent toujours une partie du même corps. Comme la Terre, la Lune est une planète complexe avec une longue histoire de changements ; mais les deux corps ont évolué vers des voies différentes. L'histoire primitive de la Lune est une période de grande chaleur primaire, de bombardements catastrophiques par des astéroïdes énormes, de grandes coulées de laves fondues, et ensuite de 3 milliards d'années de quiétude. Si la Terre a, de même, subi des catastrophes identiques quand elle était jeune, leurs traces ont été détruites par les périodes ultérieures d'éruptions volcaniques, de surrections des montagnes et d'érosion, tous phénomènes qui fabriquèrent les roches que nous voyons maintenant autour de nous.

Comme une retombée de l'exploration de la Lune, nous avons été amenés à apprendre comment explorer l'ensemble du système solaire. Le programme Apollo a montré que les moyens scientifiques développés à l'origine pour comprendre la Terre pouvaient être appliqués avec succès pour déterminer la nature et l'histoire de la Lune, et les techniques utilisées (**page 28**) pour étudier la Lune peuvent être maintenant appliquées aux autres planètes. Même aujourd'hui, les scientifiques ont une meilleure compréhension de leurs nouvelles photographies des surfaces de Mercure et de Mars grâce à ce qu'ils ont appris de la Lune. Et il ne faudra pas beaucoup de temps pour que la Lune serve de banc d'essai pour des instruments destinés à de plus longs voyages une fois qu'elle aura été rendue plus accessible techniquement.

4. NDT : livre écrit en 1977.

CHAPITRE DEUX

LA LONGUE VEILLE

La Lune fut l'horloge que les premiers hommes utilisèrent au cours de leur évolution depuis le stade du chasseur nomade jusqu'au fermier sédentaire. Les changements réguliers de la forme de la Lune offraient un rythme moyen de jours se succédant au cours de l'année. Utilisant les cycles croissant et décroissant de la Lune, l'homme divisa les 365 jours de l'année en 12 périodes commodes ; la forme de la Lune au cours de chaque mois mesurait le temps à un ou deux jours près.

Avec le développement d'un calendrier lunaire, l'homme devint capable d'enregistrer le passé et de prévoir l'avenir. Il apprit à planter au bon moment et à récolter le grain, développant ainsi un apport alimentaire sûr qui le libéra de sa dépendance aux aléas des techniques de chasse et de l'abondance ou de la rareté du gibier. Des villages, sédentaires, fixes, devinrent possibles et la civilisation commença.

L'Homme est un animal pragmatique et il fait un bon usage de la Lune sans se soucier de sa nature. Planter en fonction de la Lune devint moins courant au fur et à mesure que des calendriers furent établis et que des almanachs apparurent mais les applications pratiques pour l'agriculture qui **(page 30)** se fient à la Lune perdurent dans le folklore et les traditions. Les phases ascendantes de la Lune sont associées à la vie et à la croissance, alors que les phases décroissantes suggèrent plutôt la mort et la déchéance. Dans certains pays, les mères exposent encore leurs bébés à la lumière de la Lune croissante pour leurs donner de la force et les arbres sont abattus sous la Lune décroissante quand leur vigueur est supposée réduite et la coupe plus facile. La période située entre la Lune décroissante et croissante, appelée « les ténèbres de la Lune », est considérée comme un moment de grande efficacité aussi bien pour les bonnes que les mauvaises actions.

Mais l'Homme est aussi un animal doué de curiosité car même pendant qu'il utilise la Lune, il essaie de l'expliquer. Presque toutes les cultures, aussi bien primitives que modernes, ont inventé des explications concernant plusieurs phénomènes lunaires, en particulier la lumière de la Lune, ses phases, les marques claires et sombres de sa face, et les éclipses qui se produisent à certains moments.

La Lune a souvent été considérée comme une divinité, ou au moins comme un objet placé dans le ciel par quelqu'un. En Nouvelle Guinée, les habitants pensaient que la Lune était une balle brillante volée à un enfant par le Dieu Soleil, qui avait besoin d'elle pour éclairer la nuit pendant son sommeil. Les Babyloniens voyaient la Lune, qu'ils appelaient « Sinn », comme un dieu masculin, qu'ils considéraient comme ayant accordé à l'Homme la civilisation et toutes les formes de culture. Une tribu de l'Himalaya personnifia la Lune comme un homme amoureux à qui sa belle-mère insensible lançait des cendres à la figure, formant ainsi les taches sombres. Les Esquimaux du Groenland

prévenaient les jeunes filles que la Lune était un dieu qui les ferait devenir enceintes si elles étaient assez imprudentes pour dormir au clair de lune.

Dans beaucoup de civilisations, la Lune fut considérée comme une déesse, probablement parce qu'il était naturel de penser qu'elle était une sœur ou l'épouse du Soleil. Un lien encore plus ancré dans les esprits perpétue cette ancienne observation du mois lunaire de 29 jours 1/2 rythmant le cycle menstruel des femmes. Les Grecs appelaient la Lune « Sélène », qui est la racine de notre mot sélénologie, l'étude de la Lune. Pour les Romains, elle (**page 31**) était Luna, d'où dérivent des mots tels que « lunaire » et « lunatique ». D'autres noms mythologiques de la Lune comme Cynthia, Diane et Artemis offrirent du choix pour les poètes à travers les siècles.

Les effets de lumière et d'obscurité sur la Lune communément identifiés à « L'image de l'Homme dans la Lune » a de nombreuses explications mythologiques. Dans la tradition européenne, « l'Homme » fut banni de la Terre par Dieu pour un crime tel que le vol de choux à Noël ou la récolte de bois de chauffage le jour du Sabbat. Il fut aussi identifié à Caïn ou Judas Iscariote.

A cause de la courbure de la Terre, les gens habitant près de l'Équateur voient la Lune comme si elle avait été légèrement tournée. Pour les Australiens, « L'image de l'Homme dans la Lune » est complètement inversée. Les parties sombres forment alors un modèle différent, suggérant aux Orientaux un banian ou un lièvre. (cette dernière interprétation peut être à l'origine des idées contemporaines représentées par « Le Lapin de Pâques » et le rôle porte-bonheur des pattes de lapin).

La Lune a été communément associée avec le temps, particulièrement la pluie. C'est pourquoi beaucoup de gens de différentes cultures identifient les taches sombres de la Lune à des personnes en train de porter des baquets d'eau qu'ils vident sur la Terre pour produire de la pluie. Une version norvégienne de cette croyance existe encore dans la berceuse de Jack et Jill et leur seau d'eau.

Le cycle répété de la Lune allant d'un fin croissant jusqu'à la pleine Lune, rapetissant de nouveau pour revenir à un fin croissant, disparaissant et réapparaissant, fut interprété comme les pouvoirs d'une déesse qui tourne son visage vers la terre et s'en détourne, ou qui naquit, mourut et naquit à nouveau.

Des éclipses du Soleil et de la Lune se produisent lorsque, soit la Terre soit la Lune pénètre dans l'ombre portée de l'autre. Des éclipses de Lune, qui se produisent lorsque la Lune passe dans l'ombre de la Terre à l'opposé du Soleil, ne sont pas spectaculaires et peuvent passer inaperçues. Elles ont lieu la nuit, et la phase de totalité de l'éclipse dure une heure environ. Cependant, comme la lumière du Soleil diffuse à travers (**page 32**) l'atmosphère de la Terre sur la Lune, la Lune ne disparaît jamais entièrement, si bien que sa partie assombrie peut prendre une couleur cuivrée ou violacée. Ce bref changement sur la Lune, même s'il est remarqué, pourrait être confondu avec les effets du passage d'un nuage. Bien que certains mythes parlent de démons qui avalent la Lune à cette occasion, il y a peu d'indices qui montrent que les peuples primitifs avaient besoin d'une explication pour un phénomène aussi subtil.

Au contraire, les éclipses totales du Soleil peuvent être soudaines, bien nettes et effrayantes. Dans ce cas, une petite surface de la Terre entre dans l'ombre de la Lune, et le Soleil est complètement

caché en tout lieu se situant à l'intérieur de l'ombre, provoquant l'obscurité en plein jour ⁵.

Si le Soleil est seulement en partie recouvert par la Lune, la réduction de luminosité est à peine détectée par l'œil humain. Pourtant, même lorsque 98 % de la surface du Soleil sont cachés, l'effet est celui d'un crépuscule progressif et les activités humaines se poursuivent comme si de rien n'était. Mais pour les gens situés dans la zone de totalité de l'éclipse, le passage de 98 % à 100 % de l'éclipse peut être déconcertant.

Au moment où le dernier éclat de lumière disparaît, les oiseaux vont se percher, les animaux s'endorment, et la température chute brusquement. Le paysage se remplit de bandes (« les ombres volantes » NDT) étranges et ondulantes de lumière et d'ombre, et les observateurs situés en altitude voient l'ombre de la Lune sous forme d'une tache sombre d'environ 160 km de largeur, fonçant sur eux à 1600 km à l'heure. Puis il y a une obscurité soudaine, la température chute, et là où était le Soleil apparaît un halo phosphorescent d'allure fantomatique alors que la haute atmosphère du Soleil invisible en temps normal devient brillante (**page 33**) autour de la Lune.

Les peuples anciens étaient terrifiés, les batailles cessaient brusquement, rois et empereurs se prosternaient, et les astronomes imprévoyants perdaient leur tête pour n'avoir pas fait de prédictions précises. Les Indiens aussi bien orientaux qu'américains pensaient qu'un démon, dragon, grenouille ou oiseau géant dévorait le Soleil et essayaient de le faire fuir avec des tambours, des hurlements, danses, cloches et pétards. Et chacun se réjouissait quand le Soleil réapparaissait sain et sauf.

Certaines réactions des hommes modernes ressemblent parfois à celles de leurs ancêtres. Le 7 mars 1970, je me trouvais à Chincoteague Island, en Virginie, dans la fraîche obscurité d'une éclipse totale, alors que la station de recherche de la NASA, située à proximité de l'île « Wallops », envoyait une vingtaine de petites fusées dans le ciel pendant les deux minutes d'obscurité complète. Les fusées emportaient des appareils photographiques et autres instruments dans la haute atmosphère, mais le bruit de tonnerre de leurs moteurs et les traînées de feu qu'elles faisaient dans le ciel sombre produisit un spectacle qu'aucun ancien astronome chinois ou homme de médecine indien n'aurait apprécié.

La question de savoir comment la Lune exerce ses effets sur la Terre et ses habitants a été à l'origine de nombreux mythes, folklores et études scientifiques sérieuses. Marées et éclipses sont deux effets indubitables de la Lune sur la Terre. Des particularités du calendrier lunaire persistent encore d'une certaine façon, notamment dans la manière de fixer la date de la célébration du printemps : le premier dimanche après la première pleine Lune suivant l'équinoxe de printemps du 21 mars. Il y a des rapports précis mais mal expliqués entre les phases de la Lune et l'activité sexuelle de certains animaux marins. Les oursins de la Méditerranée et de la mer Rouge frayent plus activement à la pleine lune. Les vers « Palolo » du Pacifique Sud montent à la surface pour s'accoupler pendant les pleines Lunes d'octobre et novembre, pour finir par être capturés par les indigènes aux aguets postés dans des pirogues. Plus familier aux Américains est le « grunion », un petit poisson d'eau de mer qui, une nuit par an, (**page 34**) envahit les rivages de la Californie du Sud en quantité extraordinaire pour

5. Le diamètre du soleil est de 1 384 000 km soit environ 400 fois le diamètre de la Lune, mais le soleil est aussi 400 fois plus éloigné que la Lune. A cause de cette coïncidence, le soleil et la Lune paraissent avoir la même taille dans le ciel, chacun couvrant un angle d'environ un demi degré. Donc la Lune couvre le disque solaire plus ou moins parfaitement.

se reproduire, donnant l'occasion aux Californiens de faire une fête annuelle parfaitement programmée par le cycle lunaire.

Les effets possibles de la Lune sur les êtres humains sont un grand sujet de légendes et de superstitions. Le folklore abonde de contes de loups-garous et d'autres monstres générés par la Lune. Depuis des siècles, il est généralement admis que la Lune et spécialement la pleine Lune, pourrait provoquer la folie, d'où les termes utilisés dans le langage courant comme « toqué », « lunatique » et « dans la Lune ». La croyance en de tels mythes a progressivement diminué à mesure que notre connaissance sur l'esprit humain est devenue plus réaliste, tout rapport existant entre la Lune et l'environnement humain étant plus nuancé.

La coïncidence entre le mois lunaire de 29 jours $\frac{1}{2}$ et le cycle menstruel féminin est un fait bien reconnu sur le plan biologique, mais elle n'a jamais été vraiment expliquée. Les recherches de ces 20 dernières années ont montré que d'autres fonctions biologiques aussi bien chez l'homme que chez la femme ont aussi un cycle naturel. Les êtres humains ont une régularité cyclique dans des fonctions telles le sommeil et la veille, l'état de vigilance, la sécrétion de certaines hormones et la variation de réponses aux drogues. Une centaine de fonctions du corps humain sont considérées comme cycliques sur les 24 heures de la journée (rythmes circadiens). Quelques autres fonctions ont des périodes de 15 ou 30 jours, ce qui peut les rapprocher de cycles lunaires. Cette sorte de recherche, la chronobiologie, en est juste à ses débuts ⁶, et il est trop tôt pour dire si l'idée des influences lunaires, comme beaucoup d'autres croyances lunaires, est basée sur des faits scientifiques inconnus actuellement ⁷.

La préhistoire reflète la longue préoccupation de l'homme pour la Lune et ses efforts pour progresser à son sujet. Depuis plus de 30 000 ans, des hommes inscrivaient les phases de la Lune sur des **(page 35)** os sculptés. Deux mille ans avant J. C., les Babyloniens avaient construit des observatoires, avaient enregistré les mouvements de la Lune et des cinq planètes visibles, et avaient appris à prévoir les éclipses avec précision. Plus au Nord, à peu près à la même époque, les habitants d'Angleterre construisirent le grand mégalithe de Stonehenge avec la même intention.

Entre environ 400 et 150 ans avant J. C., les philosophes et mathématiciens grecs mettaient au point les instruments nécessaires à l'étude du système solaire et proposaient aussi certaines théories surprenantes par leur modernité concernant son origine. Anaxagoras et Aristote enseignaient que la Lune était objet solide éclairé par le Soleil, ce qui était un progrès sur les théories plus anciennes stipulant qu'elle était semblable à du feu ou à un nuage épais. Anaximandre et Pythagore pensaient que la Terre était un astre sphérique et qu'elle était en fait le centre autour duquel le reste de l'Univers visible tournait. Au contraire, Aristarque démontrait que la Terre et les autres planètes tournaient autour du Soleil et Nicetas (ou Hicetas) de Syracuse suggérait que la Terre tournait sur elle-même, produisant l'illusion que le Soleil et les étoiles tournaient autour d'elle.

Cependant, il y avait des limites à cette approche de la vérité de la part des Grecs. Anaxoras fut soi-disant condamné à mort (mais non exécuté) pour avoir proposé une similitude entre le feu et le Soleil

6. NDT : livre écrit en 1977.

7. Deux bonnes sources de plus amples informations sur la chronobiologie sont « The living clocks » de Ritchie Ward (New York, Knopf, 1971) et « Body time » de Gay Gaer Luce (New York, Bantam, 1973).

et pour avoir pensé que la Lune et la Terre pouvaient être faites du même matériau. Et la théorie héliocentrique d'Aristarque et de Nicetas ne fut plus admise et tomba dans l'oubli pendant seize siècles jusqu'à ce que Nicolas Copernic la remette en vigueur.

L'exceptionnelle contribution des grecs fut d'obtenir par la géométrie les premières mesures de base de l'Univers. Aristarque essaya de déterminer les distances relatives de la Lune et du Soleil par rapport à la Terre. Eratosthène calcula la taille de la Terre à 10% près de la valeur correcte, procurant ainsi le calcul de base à partir duquel purent être calculées avec précision la taille et la distance de la Lune. Hipparque calcula la distance de la Lune avec moins de 10% d'erreur. En tenant compte des **(page 36)** grandes imprécisions des méthodes primitives de mesures, une telle approche dans les résultats était un grand exploit. Hipparque calcula aussi la position d'environ 1000 étoiles, fondant ainsi la science de l'observation astronomique. Une période de 1500 années supplémentaires devait s'écouler avant que l'Homme ne sorte de cette régression du Moyen Age pour retrouver le même niveau de compréhension de son Univers.

Les découvertes des Grecs culminèrent avec le système de Ptolémée, dû à un théoricien brillant, Claudius ou Ptolémée, 150 ans après J. C. Dans ce système, la Terre était au centre de l'Univers, et le Soleil, la Lune et les planètes tournaient autour d'elle sur des orbites compliquées faites de plusieurs cercles. Pour les grecs le cercle représentait la forme géométrique divine parfaite.

Beaucoup a été dit sur l'abandon du système de Ptolémée à la Renaissance, mais il est simpliste de voir cette révolution comme le triomphe de la « bonne » théorie de Copernic sur la mauvaise de Ptolémée. Le système de Ptolémée était une construction pesante et arbitraire ne reposant pas sur des lois physiques. Mais il relia réellement des siècles d'observation des mouvements planétaires à une théorie raisonnable et bien structurée. Pendant 1500 ans il unifia tous les essais d'observation qui pouvaient être rassemblés, et il prédit les mouvements des planètes avec toute la précision nécessaire pendant cette période. Il convenait parfaitement à cette Europe où la science était dominée par le dogme, Aristote et l'astrologie ; il convenait bien également dans les pays islamiques où les sciences, y compris l'astronomie continuaient à s'épanouir.

Par ailleurs, l'intérêt principal du modèle Copernic-Kepler était artistique plutôt que le résultat d'observations ; dans ce modèle théorique, les orbites des planètes formaient de simples ellipses plutôt que des combinaisons compliquées de cercles. Les mouvements planétaires prévus ne différaient pas beaucoup du système de Ptolémée. La position exacte de Mars était calculée à 1/8 de degré près, ce qui est en gros équivalent à 1/4 de la largeur de la pleine Lune. Cette légère erreur de calcul était trop petite pour avoir été trouvée **(page 37)** par Ptolémée ou, d'ailleurs, par Copernic lui-même⁸.

Bien que Copernic suggéra dès 1506 que la Terre tournait autour du Soleil, la preuve décisive fut apportée beaucoup plus tard, au 17^e siècle, quand les observations méticuleuses de Tycho Brahé recoupèrent les apports du génie mathématique de Johann Kepler.

8. Deux excellentes références pour une lecture approfondie sur l'histoire de l'astronomie sont : « And there was light » par Rudolph Thiel (New York, Mentor, 1960) et « The sleepwalkers » par Arthur Koestler (New York, Grosset et Dunlap, 1963).

Presque immédiatement après le travail de Kepler sur les orbites elliptiques des planètes en 1605, la technologie bouleversa de façon majeure l'étude du système solaire. En Hollande, des opticiens avaient découvert comment combiner une série de lentilles de verre dans un tube pour obtenir des images agrandies d'objets lointains ; quelques années plus tard, après que les plans de ses fabrications eurent atteint l'Italie, cette lunette attira l'attention d'un professeur de mathématiques de l'université de Padoue nommé Galileo Galilei. Il reproduisit rapidement l'invention et après des essais sur des maisons et des bateaux éloignés, il tourna la lunette et regarda vers le ciel.

La longue vue de Galilée paraît presque insignifiante comparée aux modèles actuels. La plus grande qu'il construisit agrandissait environ 30 fois, procurant une image de la Lune pas beaucoup plus grande que celle donnée à travers une bonne paire de jumelles. Mais le travail de Galilée marque le début de l'astronomie planétaire comme les observations d'Hipparque inauguraient l'étude scientifique des étoiles. Le système solaire s'agrandissait et permettait de révéler des détails insoupçonnés ; les planètes devinrent plus que des lumières éclatantes dans le ciel. La lunette de Galilée révéla les phases de Vénus et les quatre grandes lunes qui gravitent autour de Jupiter comme un système solaire en miniature. Et il rapprochait aussi la Lune de l'Homme comme cela ne s'était jamais produit auparavant.

A travers la lunette, la Lune devint, une fois pour toutes, **(page 38)** un autre monde en dehors de la Terre. Les grecs avaient suggéré cela, mais Galilée fut là pour montrer que la Lune avait sa propre et exclusive géographie et ses propres aspects de surface. La Lune était un monde rugueux avec des montagnes accidentées et des centaines de creux que Galilée appela « petites taches », nous donnant ainsi la première description des cratères lunaires. Il observa que les plaques sombres qui forment les yeux et la bouche de « L'homme dans la Lune » sont plus plates et plus lisses que les régions claires. Suggérant que les régions sombres puissent être semblables aux océans terrestres, il les nomma « maria », (mare au singulier), mot latin pour « mers », terme que scientifiques et astronautes utilisent encore. Les régions brillantes, claires, accidentées appelées maintenant « continents » ou « hautes terres », étaient nommées par lui « terrae » ou « plaines ».

Mais Galilée était un homme de communication éloquent et dynamique en même temps qu'un brillant scientifique et expérimentateur. Il n'était pas le seul scientifique à étudier la Lune à ce moment là. Thomas Harriott en Angleterre avait fait des observations de la Lune et des cartes juste avant Galilée, mais ne les avait jamais publiées. Galilée, cependant, publia ses observations rapidement, utilisant un langage qui était, pour l'époque, clair et compréhensible. Dans le « Messenger des Étoiles », qui parut en 1610, il présenta ses observations soignées du système solaire avec un style agréable et accessible et présenta pour la première fois ce qui devint la vision moderne de la nature de la Lune :

« Pour une plus grande clarté, je distingue deux parties à sa surface, une plus sombre et une plus brillante. La partie la plus claire semble entourer et s'étendre sur tout l'hémisphère, alors que la plus sombre ternit la surface de la Lune comme une sorte de nuage, et la fait apparaître couverte de taches... Après des observations répétées de nombreuses fois de ces taches, j'ai été amené à penser et à être convaincu que la surface de la Lune n'est pas lisse, uniforme et parfaitement sphérique (comme

les autres astres) ainsi que le pense un grand nombre de « philosophes », (**page 39**) mais est accidentée, rugueuse et couverte de cavités et proéminences, n'étant pas différente de la surface de la Terre, et agrémentée de chaînes de montagnes et de vallées profondes ⁹ ».

Pendant le demi siècle suivant la publication des découvertes de Galilée, de nombreux observateurs dressèrent les premières cartes complètes de la Lune. En 1645, Langrenus fit une carte montrant environ 300 particularités lunaires dont 250 étaient des cratères importants. Astronome à la cour du roi Philippe II d'Espagne, Langrenus, nomma les sites de la surface de la Lune d'après les noms des rois d'Espagne et des nobles. Ces noms n'ont pas survécu à l'exception notable du cratère auquel il attribua son propre nom.

La carte d'Hevelius, publiée en 1647, représentait les montagnes lunaires dont les noms étaient inspirés des chaînes de montagnes terrestres et parmi celles-ci, les Alpes, les Apennins et les Carpathes. Cependant ce fut Riccioli, en 1651, qui établit la plupart des noms que nous utilisons aujourd'hui pour décrire les caractéristiques de la Lune. Les mers sombres reçurent des noms latins suggérant des qualités ou des caractères. Quelques « mers » qui prirent de l'importance lors du Programme Apollo sont : Mare Imbrium (la Mer des Pluies), Mare Tranquillitatis (la Mer de la Tranquillité), Mare Serenitatis (La Mer de la Sérénité), Mare Orientale (La Mer Orientale) et Oceanum Procellarum (l'Océan des Tempêtes).

Riccioli commença aussi cette pratique courante de nommer les parties de la Lune, particulièrement les cratères, d'après des noms de philosophes, scientifiques et figures historiques (Tycho, Copernic, Kepler, Platon, Aristarque, Jules César). De nos jours, cette tradition a été perpétuée par l'Union Astronomique Internationale (UAI), et les cratères sont toujours nommés d'après des scientifiques ou personnages historiques disparus, et particulièrement ceux qui se sont faits connaître par des travaux en astronomie et sur la Lune (Herschell, Yerkes, Abbott) ou sur l'exploration de l'espace (Tsiolkovsky, Goddard, Gagarine, Gast) ¹⁰.

(page 40) Alors que des scientifiques du 17^e siècle réalisaient une cartographie de la Lune, des écrivains s'activaient pour imaginer diverses Lunes fantaisistes et pour inventer des moyens miraculeux pour l'atteindre. Science et science-fiction ont toujours marché main dans la main s'agissant de la Lune.

9. Comme cité dans Stillman Drake, *Discoveries and opinions of Galileo* (New York, Double day Anchor, 1957) p. 31.

10. Sir William Herschel (1738-1822), un astronome anglais, inventa des télescopes et découvrit la planète Uranus. Charles T. Yerkes (1837- 1905) était un homme d'affaire américain qui aida à construire le fameux observatoire de Yerkes à William Bay, dans le Wisconsin. Charles G. Abbott (1872-1973) fut un astronome spécialiste du soleil, ayant vécu longtemps et ancien secrétaire du Smithsonian Institut. Konstantin Tsiolkovsky (1857-1935) et Robert H. Goddard (1882-1945) furent respectivement des pionniers russe et américain dans le développement des fusées destinées aux voyages dans l'espace. Le cosmonaute russe Youri Gagarine (1934-1968) devint le premier homme à tourner en orbite autour de la Terre en 1961. Il se tua ensuite dans un accident d'avion. Paul W. Gast (1930-1973) un scientifique éminent, supervisa les études géochimiques d'échantillons de pierres lunaires pour la NASA jusqu'à sa mort due à un cancer en 1973.

Le « Somnium » de Johann Kepler fut publié en 1634, très peu de temps après la mort du grand scientifique. Comme on pouvait s'y attendre, le voyage en rêve de Kepler vers la Lune comporte un nombre de références scientifiques remarquables. Il décrit la Terre suspendue dans le ciel lunaire, l'alternance de « jours » brûlants de deux semaines et de « nuits » glacées de même durée, en plus des quelques effets qui présagent la Loi de Gravitation Universelle de Newton.

Cette littérature spéculative évolua à mesure que nos connaissances sur la Lune s'élargissaient. En 1700, des observations avaient montré que la vie sur la Lune était improbable ; il n'y avait pas d'atmosphère significative, pas d'eau liquide, et un cycle fatal de « journées » de chaleur intense alternant avec des « nuits » de grand froid. Les lois de la gravitation de Newton avaient mis des limites définitives aux forces physiques que l'on peut utiliser pour atteindre la Lune, et il semblait probable que la plus grande partie de l'espace situé entre la Terre et la Lune était occupé par le vide au sein duquel aucun voyageur ne pourrait survivre.

Le plus passionnant et le plus lu des textes sur la Lune, au cours du 19^e siècle, fut une farce bien montée, un morceau de pure imagination, agrémenté d'une fine couche de fait scientifique, « La Farce de la Grande Lune » en 1835. **(page 41)** En Août 1835, le « New York Sun » commença à publier une série d'articles, prétendument reproduits d'un journal inexistant appelé le « Journal de Science d'Édimbourg », qui relatait que Sir John Herschel, astronome anglais distingué et fils de Sir William Herschel, était en train de faire des observations astronomiques en Afrique du Sud. Si cela était assez vrai, le reste de toute la série fut la création du journaliste du « Sun », Richard Adam Locke, qui décrivait en détails un télescope imaginaire qui pesait 77 tonnes, agrandissait 42 000 fois et faisait apparaître la Lune à une distance apparente de quelques centaines de yards. A travers le télescope, écrivait Locke, l'observateur pouvait voir des bêtes étranges et d'énormes pierres précieuses au milieu des plages lunaires, des étendues d'herbes et des cascades. Il décrivait sérieusement un bison miniature, des ours à cornes, des castors sans queue, allant même jusqu'à identifier des habitants lunaires intelligents qui « mesuraient en moyenne quatre pieds de haut et étaient recouverts, à l'exception de la face, de poils courts et lustrés de couleur cuivrée et avaient des ailes faites d'une fine membrane ».

Cette élucubration fut facilement acceptée comme véridique par des gens favorablement disposés à admettre l'idée de l'existence de la vie sur la Lune. La Farce Lunaire produisit une explosion pour l'intérêt du public et un engouement qui n'eut pas son égal jusqu'aux vols bien réels des missions Apollo. La diffusion du Sun surpassa tous les autres journaux dans le pays et, finalement, dans le monde ; le 28 août il dépassa même les ventes du Times de Londres avec un tirage extraordinaire (pour cette époque) de 20 000 exemplaires. Une version sous forme de « tiré à part » de l'article se vendit à 60 000 exemplaires, et même après que la farce eut été dévoilée au bout de quelques semaines, beaucoup de gens continuaient de croire fermement à l'existence d'hommes lunaires volants.

En raison de son impact sur le public, la Farce Lunaire fut une simple fantaisie comparée aux descriptions de voyages lunaires beaucoup plus près de la réalité scientifique faites par des écrivains du 19^{ème} siècle tels que Jules Verne et H. G. Wells. Le classique « De la Terre à la Lune » de J. Verne

et sa suite « Autour de la Lune », traduits en anglais en 1873, décrivent la construction d'un énorme canon (**page 42**) pour projeter un obus contenant trois hommes en direction de la Lune. Le système de propulsion n'aurait pas fonctionné (l'accélération aurait dû être d'environ 30 000 fois la force de gravité et, ni le projectile ni les astronautes n'auraient survécu) mais les livres sont, à part cela, d'une modernité surprenante. Jules Verne fit état de la vitesse d'échappement correcte (12 kilomètres par seconde) et il imaginait aussi l'utilisation de tests sur des animaux et les effets de l'apesanteur. Son voyage est étonnamment semblable à la mission Apollo 8 qui a eu lieu un siècle plus tard : les deux avaient un équipage de trois astronautes, un lancement depuis la Floride, un trajet autour de la Lune et un amerrissage dans l'océan Pacifique.

Les « Premiers hommes sur la Lune » de H. G. Wells envisageait l'utilisation de nouvelles technologies (dont un matériau annulant les effets de la gravité) pour amener deux explorateurs sur la Lune, où ils trouvent à la fois des plantes et une vie hostile. Le roman fut publié en 1901 à l'entrée du monde dans le vingtième siècle ; le débarquement réel de deux hommes sur la Lune prit ensuite moins de temps que la durée d'une vie d'homme.

CHAPITRE TROIS

L'ORIGINE DE LA LUNE : « AUCUNE EXPLICATION N'EST POSSIBLE »

Au commencement du vingtième siècle les caractères physiques de la Lune ont commencé à être bien connus alors que des questions sur ses origines et son histoire restaient encore non résolues. Sa taille, son poids et sa densité avaient tous été déterminés avec précision. Ses mouvements avaient été observés avec précision et sa position pouvait être prédite pour des millions d'années à venir.

Les coordonnées de base de la Lune ont été bien établies depuis ces 75 dernières années. La Lune tourne autour de la Terre sur une orbite quasi circulaire située à environ 382 000 kilomètres. Ce n'est pas une grande distance ; un représentant de commerce parcourt cette distance en moins de deux ans. La Lune est une sphère dont le diamètre est de 3 500 kilomètres, soit environ la distance entre New York et El Paso au Texas ou entre St Louis et San Francisco. La superficie de la Lune est d'environ 38 millions de km² soit près de la superficie de l'Amérique du Nord et du Sud réunies.

Bien que le diamètre de la Lune soit d'environ le quart (**page 44**) de celui de la Terre, la Lune ne pèse que le 1/80 seulement environ du poids de la Terre. La force de gravité à la surface de la Lune est seulement le 1/6 de celle de la Terre. Un astronaute entièrement équipé pesant environ 160 kilogrammes sur la Terre ne pèse qu'environ 27 kilogrammes sur la Lune.

Outre ces paramètres de base, une différence fondamentale apparaît entre la Terre et la Lune. La densité de la Lune (la masse divisée par le volume) est de 3,35 g par cm³ (l'eau pèse 1g par cm³), alors que la densité de la Terre est de 5,5. Le fait que la Terre soit 60% plus dense que la Lune suggère qu'il y a une différence dans leur composition chimique, différence difficile à expliquer pour deux objets si près l'un de l'autre dans l'espace.

Il y a un autre aspect intéressant quant aux densités différentes de la Terre et de la Lune. La croûte externe de silicates de la Terre a environ 3 200 km d'épaisseur et a une densité moyenne d'environ 3,3, ce qui est presque égal à celle de la Lune. Cette coïncidence des densités est un élément de base de géologie lunaire, coïncidence à laquelle doivent se confronter toutes les théories sur l'origine de la Lune. La Terre a aussi un noyau central plus dense de fer métallique, mais apparemment la Lune n'est pas assez lourde pour avoir un gros noyau comme celui de la Terre.

La Lune n'a pas d'atmosphère. Quand des étoiles passent derrière la Lune, elles disparaissent nettement et instantanément sans que la lumière de l'étoile ne s'estompe graduellement comme cela se produirait si leur lumière passait à travers une atmosphère lunaire. Des études plus récentes ont montré que les sources radio naturelles dans le ciel sont interrompues de la même manière soudaine lorsque la Lune passe devant celles-ci. Ces passages montrent qu'à la surface de la Lune règne un

vide plus complet que celui produit dans quelque laboratoire terrestre que ce soit.

L'absence d'une atmosphère lunaire n'est pas surprenante ; la gravité sur la Lune est trop faible pour retenir une atmosphère comme celle de la Terre. Si des gaz relativement légers tels que l'oxygène, l'azote et (**page 45**) la vapeur d'eau furent un temps présents sur la Lune, leurs molécules ont dû s'échapper dans l'espace depuis longtemps ¹¹.

Cette absence d'atmosphère fait que, contrairement à ce qui se passe sur la Terre, la surface de la Lune n'a pas de protection contre le bombardement continu des fines météorites et contre l'irradiation mortelle des rayons X, gamma ou cosmiques venant du Soleil et du reste de l'univers. Heureusement pour nous, ces matériaux et rayonnements dangereux sont absorbés par notre atmosphère avant d'atteindre la surface de la Terre.

La Lune tourne sur son orbite autour de la terre en 27,3 jours (mois sidéral). Cependant, la Terre aussi a un mouvement sur son orbite autour du Soleil alors que la Lune tourne autour de la Terre. Il en résulte que l'angle d'illumination de la Lune par le Soleil change légèrement, et il faut un temps plus long avant que la Lune ne revienne au point où son aspect redevient identique, vu de la Terre. Cette dernière période, d'une phase de pleine Lune à l'autre est de 29,5 jours (mois synodique), et elle a été longtemps la base du calendrier lunaire.

La Lune est aussi « verrouillée » sur son orbite, et pendant qu'elle tourne autour de la Terre, elle tourne si lentement qu'elle garde toujours la même face tournée de côté de la Terre. (figure A). Ainsi la Lune tourne une fois sur son axe dans le même laps de temps qu'elle effectue un tour autour de la Terre. Pour garder une face tournée toujours vers la Terre, la Lune doit tourner le « dos » au soleil pendant la moitié de son orbite (on peut démontrer cet effet en marchant en rond autour d'un objet tel qu'une lampe ou une vasque pour les oiseaux tout en gardant le regard tourné vers lui).

Il résulte de ces mouvements que le mois lunaire de 29 jours $\frac{1}{2}$ est divisé en un « jour » lunaire et une « nuit » lunaire de chacun deux semaines environ. Comme la Lune n'a pas d'atmosphère isolante, la température « de jour » sous la lumière du soleil est d'environ 134 °C (270 °F), bien au dessus de la température d'ébullition (**page 46**) de l'eau. Pendant la « nuit lunaire », la température chute brusquement à - 170 °C (- 270 °F), soit beaucoup plus bas que le point de congélation du dioxyde de carbone (neige carbonique).

Des cartographies de la Lune ont été réalisées avec plus de détails que de nombreuses parties de la Terre. Des observateurs du début du vingtième siècle ont mis à notre disposition des cartes excellentes faites par de Beer et Mädler (1850) et Schmidt (1878) avec de petits instruments. Avec l'amélioration des techniques, ces cartes furent suivies d'autres grâce aux efforts d'observateurs tels que Wilkins (1935) et Fauth (1964). Vers 1960, le centre d'information et de cartographie aéronautique de l'U. S. Air Force commença un programme ambitieux qui permit la cartographie du côté visible de la Lune dans sa totalité à l'échelle de 1/1 000 000.

11. La force de gravité de la Lune est assez puissante pour retenir des atomes plus lourds tels que l'argon et le radon, mais il n'y a pas assez de ces éléments présents pour faire une atmosphère tangible. Voir page 204.

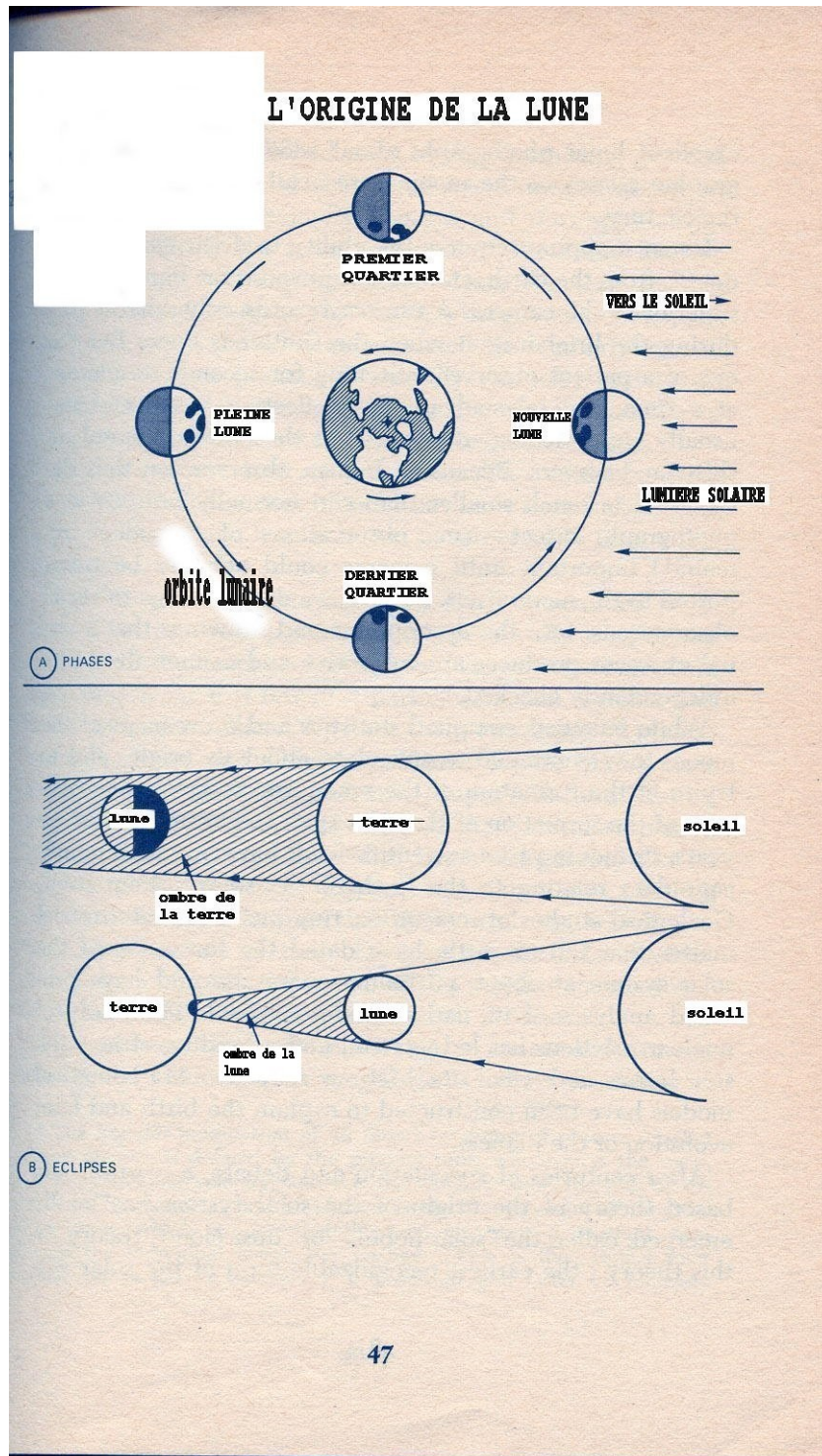


Figure A. [de la page 47] La lumière et l'obscurité de la Lune. Les phases de la Lune (A) et les éclipses (B) résultent de son éclairage par le soleil aux différents points de son orbite autour de la terre. (Les dessins ne sont pas à l'échelle et la Lune, la Terre et le Soleil sont en réalité beaucoup plus éloignés les uns des autres).

La Nouvelle Lune (A) se produit quand la Lune est entre la Terre et le Soleil, si bien que la face visible depuis la Terre est complètement sombre. La « Pleine Lune » se produit au point opposé de l'orbite lunaire quand la face visible depuis la Terre est éclairée entièrement. (Les parties sombres représentent les mers lunaires et forment « l'homme dans la Lune »).

Alors que la Lune tourne autour de la Terre, elle tourne sur son axe si bien que la même partie reste toujours tournée vers la Terre. Ainsi la Lune tourne une fois sur son axe pendant qu'elle tourne une fois autour de la Terre.

Les éclipses (B) se produisent uniquement quand la Lune, la Terre et le Soleil sont parfaitement alignés. Comme l'orbite de la Lune est légèrement inclinée par rapport à l'orbite de la Terre autour du Soleil, cet alignement parfait ne se produit que rarement. Une éclipse de la Lune (en haut) se produit quand la Lune passe dans l'ombre de la Terre. Une éclipse de Soleil (en bas) se produit quand l'ombre de la Lune traverse une partie de la surface de la Terre.

Ces cartes, y compris les plus modernes, furent dessinées presque entièrement à partir d'observations visuelles directes. La première photographie de la Lune fut prise vers 1840, presque immédiatement après l'invention même de la photographie. Cependant la photographie ne devint pas un moyen essentiel de cartographie lunaire avant l'avènement de l'ère spatiale malgré le fait que l'observatoire de Lick en Californie ait produit (**page 48**) d'excellentes photographies lunaires vers 1880 et que plusieurs atlas photographiques de la Lune aient été proposés au tournant du siècle.

La cartographie lunaire impose la capacité de discerner de petits détails depuis la Terre, et dans ce but, l'œil humain est supérieur à l'appareil photographique. Celui-ci n'enregistre que ce qu'il voit pendant le bref instant de son ouverture. Mais l'œil d'un observateur patient, regardant pendant des secondes ou des minutes d'affilée, peut profiter des instants fugaces où disparaissent les turbulences atmosphériques. Comme l'observation humaine peut ainsi détecter des objets beaucoup plus petits que ce qui peut normalement être vu sur une photographie, les observations directes de la Lune demeurent importantes jusqu'à ce que des appareils photographiques puissent être réellement transportés sur la Lune. (Il y a cependant des inconvénients aux observations visuelles : les descriptions et dessins produits par un observateur sont subjectifs et ne peuvent pas toujours être comparés).

Alors que des scientifiques rassemblaient des statistiques et dressaient des cartes de la Lune, ils continuaient à réfléchir sur son origine, et à essayer d'intégrer la formation de la Lune dans le concept de la formation du système solaire. Pendant les 30 dernières années, des études dans différents domaines scientifiques ont abouti à des idées sérieuses sur la naissance du système solaire. Des études géologiques de météorites, petits morceaux de matière extraterrestre tombés sur la Terre, ont permis de dater la formation du système solaire aux environs de 4,6 milliards d'années et ont fourni des analyses du matériau solide originel. L'étude des réactions nucléaires nous a conduit à la compréhension de la combustion solaire et à la notion d'espérance de vie que peut avoir le Soleil. Des modèles mathématiques ont été établis pour expliquer la naissance et l'évolution ultérieure des planètes.

Après des siècles de réflexion et de discussions, une théorie scientifique de l'origine du système solaire s'est fait jour, appelée théorie de la « nébuleuse solaire » ou du « nuage de poussières ». Selon cette théorie, la plus ancienne forme identifiable du système solaire (**page 49**) est une énorme masse de gaz et de poussières en forme de disque tournant lentement (la nébuleuse solaire), dont l'origine remonte à 4,6 milliards d'années. Progressivement, le gaz et la poussière s'enroulèrent en spirale, et

finalement la plus grande partie interne du nuage devint suffisamment dense et chaude pour former le Soleil. Vers l'extérieur du nuage, où il faisait plus froid, la poussière et des petites particules s'agglomérèrent à intervalles régulièrement espacés pour former des planètes. En fin de compte, le système solaire acquit la forme actuelle : un Soleil, 9 planètes, (ndt : en 1977), 34 Lunes ¹², et d'innombrables petits astéroïdes, météorites et comètes. Le temps qu'il fallut pour arriver à ce résultat n'est pas connu avec précision. La preuve apportée par les météorites montre que cela n'a pas dû prendre plus de quelques millions d'années ; il se pourrait même que moins de quelques milliers d'années furent suffisants.

La théorie du « nuage de poussière » comporte encore beaucoup de problèmes non résolus. Les fines particules de poussière n'ont pratiquement pas de force gravitationnelle pour s'attirer mutuellement ; donc, quel mécanisme peut avoir été à l'origine de l'agglomération des premières particules de poussière et de la formation des plus grands objets ? Pourquoi y a-t-il deux sortes de planètes, les petites, denses (Mercure, Vénus, Terre et Mars) proches du soleil, et les géantes gazeuses (Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune) plus éloignées ? Pourquoi la planète la plus éloignée, Pluton, (ndt : en 1977), est-elle petite et dense au lieu de grande et gazeuse comme ses voisines ? Est-ce que le nuage de poussière originel en entier tourbillonnait rapidement ? Comment se fit-il que le Soleil central, qui contient 99,9 % de la masse totale du système solaire finisse avec seulement 2% du moment angulaire ¹³ alors que les planètes rassemblaient d'une manière ou d'une autre tout le reste ?

Par ailleurs, le couple Terre-Lune est une anomalie dans le système solaire. Notre Lune est très grande pour un satellite, presque aussi grande que la planète Mercure, mais elle tourne autour d'une planète relativement petite. Cette disposition est unique dans le système solaire. Les autres planètes de la taille de la Terre n'ont pas de lune du tout, excepté Mars qui en a deux petites (Phobos et Deimos) de quelques kilomètres seulement de diamètre. Des satellites aussi grands que notre Lune se trouvent seulement autour des planètes géantes. Quatre des 12 satellites de Jupiter ¹⁴, les quatre premiers satellites vus par Galilée, se rapprochent de la taille de la Lune ; Io et Europe sont légèrement plus petits et Ganymède et Callisto sont plus grands. Titan, la plus grande des lunes de Saturne, a un diamètre de 50% plus grand que notre propre Lune, et est suffisamment massive pour retenir une sorte d'atmosphère gelée.

A un observateur situé sur Mars ou Vénus, la Terre et la Lune apparaîtraient ensemble comme une unique « planète double », l'une bleue, l'autre blanche. La Lune, plus petite, refléterait la lumière solaire et apparaîtrait blanche. La Terre, plus grande, apparaîtrait bleue à cause de la réflexion de la

12. (NDT : ce livre date de 1977) en 2007 : 8 planètes, du fait du « déclassement » de Pluton

13. Le moment angulaire d'un objet ou d'un groupe d'objets tournant autour d'un axe est défini par le produit mvr où m est la masse, v la vitesse de rotation et r la distance depuis l'axe de rotation. Une loi fondamentale de physique est la Conservation du Moment Angulaire, qui oblige le total mvr à rester constant même si un des termes du produit change. Donc, alors que la nébuleuse solaire originelle se contracte (r décroît), elle commence à tourner plus vite (v augmente pour compenser la diminution de r). Un exemple simple de ce principe est donné par le patineur en train de tourner sur lui-même et qui ralentit quand ses bras s'étendent et accélère sa rotation lorsque ses bras se rapprochent du corps.

14. (NDT : livre datant de 1977, car actuellement 40 satellites au moins sont connus),

lumière solaire sur les océans et à cause de la dispersion de la lumière solaire dans l'atmosphère. (Cette dispersion des rayons solaires explique ce qui fait apparaître le ciel bleu, à nous terriens.)

La particularité de ce système a rendu difficile son intégration dans une théorie unique acceptable de la formation du système solaire. Alors que les scientifiques continuaient à observer et à spéculer, trois théories différentes, toutes également plausibles, furent proposées pour expliquer l'origine de la Lune.

Suivant la théorie de la « fission » ou de « l'échappement », la Lune est fille de la Terre. Cette théorie suggère qu'une unique grande planète se forma là où la Terre est maintenant et alors qu'elle se refroidissait, elle commença à tourner si rapidement qu'elle s'aplatit comme un disque, puis comme une saucisse, et finalement se cliva en deux parties. La plus grande partie devint la Terre et la plus petite fut lancée sur une orbite pour devenir la Lune.

La théorie de la « double planète » suggère que la Terre et la Lune se condensèrent en deux corps séparés lors de la formation du système solaire. La Lune est donc une « sœur » de la Terre. Les deux corps se formèrent ensemble et sont restés proches l'un de l'autre depuis.

(page 51)

La théorie de la « capture » représente la Lune presque comme une « fiancée » de la Terre. La Lune se forma séparément dans une autre partie du système solaire, peut-être dans la ceinture des astéroïdes, ou peut-être complètement en dehors du système solaire. Quelques temps après sa formation, elle passa suffisamment près de la Terre pour être capturée par la gravité terrestre et maintenue en orbite autour d'elle. Cette théorie n'explique pas comment la Lune se forma, elle explique simplement comment elle se trouve là où elle est maintenant.

La théorie de la fission fut proposée aux environs de 1880 par G. H. Darwin (184-1912), le fils du célèbre biologiste anglais Charles Darwin. Le jeune Darwin faisait autorité sur la nature et les effets des marées produites sur la Terre par le Soleil et la Lune, et sa théorie était déduite d'un fait démontré : à cause de l'action des marées sur la Terre, la Lune s'éloigne de la Terre, et elle a dû être beaucoup plus proche dans le passé.

Presque tout le monde est familiarisé avec le va et vient des marées le long des rivages marins, et la plupart des gens savent que les marées sont dues à l'attraction de la Lune et, dans une moindre mesure, du Soleil. Les plus grandes marées se produisent dans les océans ; une amplitude d'environ 75 centimètres entre marée haute et marée basse se produit en pleine mer, et même de plus grandes marées se produisent le long de certains rivages. La Lune produit aussi des marées sur l'écorce terrestre, mais les roches sont beaucoup plus rigides que l'eau, et le mouvement a une amplitude d'environ 11,5 centimètres et ne peut être détecté que par des mesures plus précises.

Un effet moins évident des marées est le ralentissement de la Terre. Le frottement des marées le long des côtes (**page 52**) et des fonds marins dissipe environ deux milliards de chevaux-vapeur d'énergie et agit comme un frein à la rotation de la Terre. L'effet est léger mais réel : chaque jour est environ 5/100 000 000 de seconde plus long que le précédent. C'est une quantité insignifiante, mais comme les intérêts financiers, cela s'additionne avec le temps qui passe. En seulement un siècle, ce petit changement produit une différence d'environ 33 secondes, ce qui est assez grand pour être

décelé dans les horaires d'anciennes éclipses.

Alors que la Terre ralentit, la Lune doit s'éloigner pour que le moment angulaire total du système Terre-Lune demeure constant. Des calculs récents suggèrent que la Lune s'éloigne de la Terre au rythme de 2 centimètres par an, environ, ou de 2 mètres par siècle.

D'anciennes roches terrestres ont récemment apporté la preuve que le ralentissement de la Terre et le mouvement centrifuge de la Lune se poursuivent depuis une grande partie de la vie sur Terre. En 1963, J. W. Wells (1907- ?) a décrit les structures de croissance de coraux fossiles prélevés dans des roches sédimentaires âgées de 400 millions d'années. Il retrouva un cycle de croissance annuelle qu'il subdivisa en environ 400 stries quotidiennes, suggérant que l'année comportait environ 400 jours et que chaque jour comptait environ 21 heures et demi au lieu des 24 heures actuelles.

Reconstituant le mouvement de la Lune dans le temps passé, Darwin remonta à une époque où la Lune était à environ 16 000 kilomètres de la Terre et sa vitesse de rotation autour d'elle en 5 heures $\frac{1}{2}$. (La Terre tournait aussi sur son axe à la même vitesse, si bien que le jour et le mois étaient tous les deux longs de 5 heures $\frac{1}{2}$). Darwin en arriva à suggérer que la Lune avait été en réalité arrachée à la Terre sous l'effet de grandes marées provoquées par le Soleil sur la planète en rotation rapide.

La théorie de la fission souffre cependant de l'absence d'un modèle mathématique convaincant en faveur d'un réel processus de séparation, et d'incertitudes sur ce qu'auraient pu être les propriétés mécaniques et physiques de la planète originelle.

(page 53)

L'observation de l'éloignement de la Lune par rapport à la Terre ne prouve pas nécessairement que la fission se soit produite ; ce mouvement peut être expliqué par d'autres théories sur l'origine de la Lune ¹⁵.

Malgré ses incertitudes, la théorie de la fission permet de prévoir ce à quoi pourraient ressembler les roches lunaires. La théorie suppose que la séparation de la Terre et de la Lune a dû se produire au moment de la formation de la Terre, il y a 4,6 milliards d'années, d'où il ressort que la Lune doit être âgée de plus de 4 milliards d'années et peut-être de 4,6 milliards d'années, ou encore être aussi âgée que les météorites elles-mêmes. Donc, la Lune se serait détachée de la partie extérieure de la Terre originelle. La Lune serait en conséquence composée de silicates comme ceux qui forment la partie extérieure de la Terre, et elle aurait un peu de fer et d'autres métaux qui se sont rassemblés dans le noyau de la Terre avant que la Lune ne se détache.

La théorie des « planètes jumelles » découlait de la version plus moderne selon laquelle le système solaire s'était formé à partir d'un nuage de poussière tourbillonnant originel, avec la Terre et la Lune occupant maintenant la place où deux planètes se condensèrent au lieu d'une seule. Bien que cette idée soit cohérente avec la théorie du « nuage de poussière », comme origine du système solaire, cela

15. L'astronome W. H. Pickering (1858-1938) proposa une version plus récente de la théorie de la fission, selon laquelle la Lune était supposée venir de l'Océan Pacifique. Cette théorie, jamais unanimement acceptée, a été maintenant totalement récusée grâce à une preuve apportée récemment par des forages sous-marins montrant que le bassin océanique ne pouvait pas être âgé de plus de 200 millions d'années, donc beaucoup trop jeune pour avoir été impliqué dans la formation de la Lune.

présente encore des difficultés. Pourquoi deux planètes se seraient-elles formées au lieu d'une ? Des calculs de mécanique céleste montrent qu'un corps qui atteint la taille de la Lune aura une force gravitationnelle suffisante pour ramasser et récupérer toutes les plus petites particules solides qui l'entourent. Donc, dès qu'une petite planète atteint une certaine dimension, elle empêche toute autre formation dans son voisinage. D'une autre manière, si un corps unique a atteint la taille de la Lune n'importe où dans le système Terre-Lune, alors, aucun autre corps n'aurait pu se former à proximité. (page 54)

Même si ce problème mécanique avait été résolu d'une manière ou d'une autre, la différence apparente de composition entre la Terre et la Lune est une autre pierre d'achoppement pour les partisans de la théorie des « planètes jumelles ». Pourquoi deux corps de composition différente se formeraient presque à la même place dans le nuage de poussière originel ? Un certain nombre d'explications ont été proposées dont la plupart font intervenir des différences de températures de solidification ou des relations complexes entre réactions chimiques et forces magnétiques ou gravitationnelles. Ces explications ajoutent tellement de complications à la théorie de base que certains scientifiques commencent à se demander s'il ne pourrait pas y avoir une explication entièrement différente et beaucoup plus simple à l'origine de la Lune.

La composition de la Lune était plus difficile à trouver si elle s'était formée comme une « double planète » avec la Terre. La Lune devrait montrer des similitudes chimiques avec la Terre. Elle pouvait aussi ressembler aux petites météorites qui s'étaient formées dans le système solaire au même moment. La Lune pouvait être un échantillon préservé et inchangé d'une partie du matériau qui forma la Terre.

La troisième théorie, selon laquelle la Lune fut capturée par la Terre après s'être formée ailleurs, rend possible l'explication des quelques différences de composition chimique entre la Terre et la Lune. Le nuage de poussière originel n'avait probablement pas la même composition chimique partout, et un corps qui se serait formé dans la ceinture d'astéroïdes ou près de l'orbite de Vénus aurait été probablement différent de la Terre.

Si la Lune a été capturée, il est possible d'estimer quand la capture a pu avoir lieu. L'orbite de la Lune et son éloignement progressif de la Terre sont bien connus. Si ces mouvements sont calculés en remontant très loin dans les temps géologiques, il apparaît que l'orbite de la Lune et la distance Terre-Lune ont subi des changements brusques et radicaux il y a environ 1,5 à 2 milliards d'années. Ce brusque changement, est-il suggéré, (page 55) représente le moment de la capture de la Lune. Le corollaire de cette théorie est que le système Terre-Lune n'est pas aussi âgé que la Terre elle-même et que la Lune a été capturée longtemps après que nombre de roches terrestres encore intactes se soient formées.

Cependant la théorie de la capture comporte aussi des problèmes difficiles. En premier lieu, la capture est un événement très improbable ; un corps de la taille de la Lune passant près de la Terre aurait beaucoup plus de chance de s'écraser sur la Terre ou de la manquer complètement. De plus il y a une quantité de problèmes mécaniques. Pour ralentir un corps animé d'une vitesse de plusieurs kilomètres par seconde et le mettre en orbite autour d'une planète, de grandes forces doivent être

appliquées et une grande quantité d'énergie doit être soustraite au corps errant ¹⁶. Finalement, les forces impliquées dans la capture auraient produit des changements catastrophiques aussi bien sur la Terre que sur la Lune. Mais les roches terrestres préservées ne montrent pas d'indice de fusion étendue anormale, de séismes, d'inondations ou d'éruptions volcaniques vers 2 milliards d'années. En fait, la géologie montre qu'il y a eu des océans et des marées depuis au moins 3,5 milliards d'années, ce qui signifie que la Lune a tourné depuis plus de temps que ne le suggère les mesures en rapport avec la « capture ».

Même dans le cadre du modèle de la capture, la nature chimique de la Lune était impossible à prédire ; venant de n'importe où, la Lune pouvait être littéralement n'importe quoi. **(page 56)** Néanmoins, cette théorie rendait plus intéressant cet objet qu'est la Lune. Elle pouvait être un astéroïde, une agglomération de matière issue du voisinage de Vénus ou Saturne, ou même un fragment entièrement venu d'au delà du système solaire. S'il s'est trouvé que la Lune est un objet originel, à l'exception d'une période brève et violente de réchauffement et de production de lave il y a 2 milliards d'années environ, alors la théorie de la capture serait la meilleure explication.

Mais jusqu'à ce que de réelles roches lunaires puissent être analysées et leurs âges déterminés, toutes les théories pour expliquer l'origine de la Lune dépendent de mécanismes incertains, d'hypothèses improbables, de calculs mathématiques complexes, et de la rétrospective aléatoire de milliards d'années à partir d'observations datant de quelques siècles seulement. Aucune des trois théories n'était particulièrement convaincante et toutes les explications semblaient incertaines et improbables. H. C. Urey (1893- ?), prix Nobel de chimie, qui devint un des chercheurs les plus actifs sur l'origine de la Lune, résumait l'incertitude en disant : « toutes les explications sur l'origine de la Lune sont improbables », ce qui est une autre façon de dire qu'aucune d'elles ne le satisfaisait.

Il est naturel que l'incertitude sur l'origine de la Lune se reflète dans la discussion et le désaccord sur l'origine des caractéristiques de sa surface, en particulier. Toute chose observée sur la Lune provoquait plusieurs explications contradictoires.

Les débats sur l'origine des nombreux cratères lunaires commencèrent presque immédiatement après leurs premières observations par Galilée en 1610. Une des explications était que les cratères provenaient d'explosions d'origine volcanique. Une autre était que les cratères provenaient du bombardement de la Lune par des météorites et des astéroïdes.

La première publication fut exposée dès 1665 par Robert Hooke (1635-1703), un naturaliste anglais qui n'observa pas seulement la Lune mais, avec une méthode moderne surprenante, fit des expériences pour essayer de reproduire des cratères lunaires en réduction. Dans son livre « Micrographia » (1665), Hooke **(page 57)** démontra les rapports entre la chaleur et le volcanisme en

16. Le programme spatial offre une quantité d'exemples modernes de processus de capture. Le module Apollo nécessite une rétrofusée pour ralentir suffisamment afin de passer de la trajectoire Terre-Lune à l'orbite circumlunaire. Sans cette rétrofusée, la vitesse aurait été si grande que le module aurait tourné autour de la Lune et aurait repris le chemin vers la Terre ou serait parti dans l'espace. Les sondes automatiques Pioneer 10 et 11 n'ont pas été ralenties lors de leurs récents survols de Jupiter ; il en est résulté qu'elles ont tourné autour de Jupiter en récupérant un supplément d'énergie grâce à la force d'attraction de Jupiter, et s'en sont éloignées beaucoup plus vite qu'elles s'en étaient approchées.

faisant bouillir un mélange d'eau et d'albâtre (l'équivalent du plâtre de Paris moderne) et observant les résultats :

... le plus remarquable effet fut ce que je pus observer, dans un vaisseau rempli d'albâtre porté à ébullition, pour ce que cette poudre (réduite à une sorte de consistance fluide du fait de l'éruption des vapeurs), si je la pousse tout doucement vers le bord du foyer tandis qu'elle bout, cesse alors dans l'instant de bouillir ; et toute la surface, particulièrement les points où se sont formées les ultimes bulles, nous apparaît partout couverte de petits entonnoirs de la même forme que ceux de la Lune ; et si l'on tient une chandelle allumée, dans une vaste salle obscure, en diverses positions par rapport à cette surface, on peut exactement reproduire tous les Phénomènes des entonnoirs lunaires selon qu'ils sont plus ou moins illuminés du Soleil.

Avec d'autres expériences, Hooke démontra que des impacts pouvaient aussi former des cratères. Il utilisait

... un mélange mou et judicieusement équilibré de terre à pipe et d'eau dans lequel je laissais choir un corps lourd comme une balle de mousquet : celle-ci repoussait le mélange en cercle tout autour et pour un moment créait un effet assez semblable à ce que nous observons sur la Lune ; mais si nous considérons l'état et la condition lunaires, il ne semble guère possible d'imaginer que ceux-ci pussent venir d'une cause analogue à celle-là ; car il serait difficile d'imaginer d'où ces corps pourraient provenir, et de même de concevoir comment la matière de la Lune pourrait être à ce point molle¹⁷ ..

Nous ne pouvons pas en vouloir à Hooke pour son incertitude sur l'origine des corps venant percuter la Lune. Du temps de Hooke, personne ne savait que des comètes tournaient autour du Soleil ou que des astéroïdes existaient. **(page 58)** Presque un siècle et demi était passé depuis la publication de « *Micrographia* » avant qu'une averse de météorites de grosse taille et bien identifiées, frappant une petite ville de France, persuadent les scientifiques que des pierres venant de l'espace pouvaient réellement frapper la Terre et pouvaient avoir aussi bien percuté la Lune.

Le débat sur les origines des cratères lunaires par impact ou volcanisme a duré 300 ans, et, même maintenant, n'est en aucune manière terminé. Même avant les alunissages d'Apollo, la plupart des scientifiques étaient disposés à admettre qu'il y avait des petits cratères de deux sortes sur la Lune. Les « volcanistes » devaient admettre que la surface de la Lune dénuée d'atmosphère devait être frappée par des météorites qui devaient former de petits cratères. A l'inverse, la plupart des « impactistes » admettaient qu'il y avait quelques petits cratères lunaires d'apparence volcanique. Ces cratères ont moins de quelques kilomètres de diamètre, ou environ la taille de volcans terrestres. Il leur manque un rebord surélevé et n'ont pas de matériau d'éjection autour d'eux, et ils sont souvent disposés en lignes ou en motifs réguliers que des météorites, dont les impacts se font au hasard, ne produiraient probablement pas.

Le vrai débat entre « impactistes » et « volcanistes » a fait rage autour de la question de savoir si les

17. Ibid, p. 243.

grands cratères lunaires et même les grands bassins de « mers » se formèrent sous l'effet d'impacts d'astéroïdes dont les diamètres se comptent en kilomètres ou à cause d'éruptions volcaniques d'une intensité jamais vue sur Terre. Cette discussion a abouti à peu près à une impasse ; une raison est que la géologie de la Terre apporte des preuves qui confortent les deux théories.

L'action volcanique est très répandue sur la Terre, et les géologues peuvent montrer qu'une variété de structures volcaniques ressemble à des cratères lunaires. Il y a de nombreuses montagnes volcaniques comme le Vésuve (Italie), Fujiyama (Japon), Paricutin (Mexique), Kilauea (Hawaï), et des centaines d'autres en Islande, Sibérie et Amérique du Sud. Ces volcans ressemblent aux pics centraux observés dans certains grands cratères lunaires. De surcroît, la Terre offre aussi de nombreux effondrements volcaniques (caldeiras), certains ont 10 à 30 kilomètres de (**page 59**) diamètre et ressemblent de près à de nombreux cratères lunaires (Crater Lake en Oregon, d'environ 10 kilomètres de diamètre est une caldeira bien conservée familière aux touristes américains)¹⁸.

Pendant, même les plus grandes caldeiras terrestres ne représentent qu'une fraction du diamètre de nombreux grands cratères lunaires tels que Bailly (311 km), Clavius (231 km), Copernic (91 km), et Tycho (87 km). Les « volcanistes » prétendirent que la plus faible gravité lunaire rend possible la formation de structures d'effondrement volcanique beaucoup plus grandes que sur la Terre, mais les arguments mécaniques en faveur de cette idée ne furent, en aucun cas, convaincants.

Mais ce qui est plus important, c'est que les « impactistes » pouvaient apporter une somme de preuves de plus en plus nombreuses grâce aux impacts de météorites géantes sur la Terre dans un passé récent. En 1950, des scientifiques avaient identifié environ une douzaine de cratères formés par de tels impacts au cours des 100 000 dernières années. Le plus grand, le fameux Meteor Crater en Arizona, formé il y a moins de 50 000 ans, a plus d'un kilomètre de diamètre. Si la Terre a été frappée par, environ, une douzaine de grandes météorites pendant les dernières 100 000 années, alors, pendant les 4,6 milliards d'années écoulées depuis la formation de la Terre, celle-ci a eu largement le temps d'être bombardée par des milliers d'objets encore plus grands. Il y a encore de nombreux grands astéroïdes qui traversent l'orbite de la Terre aujourd'hui, et il devait y en avoir beaucoup plus dans le passé.

Il y a beaucoup plus de cratères d'impact visibles sur la Lune, prétendaient les impactistes, car même les plus vieux cratères (**page 60**) ont pu être préservés sur la Lune sans atmosphère et sans eau. Au contraire, les anciens cratères sur la Terre avaient été amplement détruits par l'érosion ou ensevelis sous des couches de roches sédimentaires plus jeunes.

Suivant l'endroit où l'on regarde, la Terre offre ainsi la possibilité de voir soit des traces

18. Il y a aussi de nombreuses éruptions volcaniques sur la Terre qui ne produisent ni volcans ni caldeiras. Ces éruptions se présentent comme des coulées de lave qui se déversent dans de larges fissures de la Terre et se répandent sur de nombreux kilomètres alentour. De telles éruptions ont élevé des plateaux de basalte en couches dans des lieux tels que l'Islande, l'Inde et le Nord-Ouest des États Unis. Les laves qui couvrent les mers lunaires furent apparemment produites par ce type d'éruption. Les laves des « mers » ne viennent pas de cratères isolés, et de nombreux grands cratères tels que Copernic et Tycho sont beaucoup plus jeunes que les « mers » de lave. Pour cette raison, la notion de « mer » lunaire recouvertes de lave basaltique n'influence pas la discussion sur l'origine des cratères lunaires.

d'impactisme soit des traces de volcanisme et l'observation au télescope de la Lune elle-même ne permettait pas de résoudre la controverse. La surface de la Lune est un endroit complexe et diversifié qui apportait la preuve soit de l'impactisme soit du volcanisme ¹⁹.

De nombreux cratères comme Copernic (Photo 2), montrent des aspects que l'on pourrait attendre de grands impacts. De tels cratères sont circulaires, et ils sont entourés de couches surélevées d'un matériau apparemment expulsé en dehors du cratère sous l'effet du souffle à la suite de l'impact d'un grand corps. Beaucoup de ces cratères, et spécialement Tycho et Copernic, ont un système de raies brillantes interprétées comme des traînées de matériau éjecté du cratère et éparpillé sur des centaines de kilomètres à la surface de la Lune ²⁰.

(page 61)

D'autres grands cratères, par exemple Platon et Alphonse, offrent tous les deux une bonne preuve indirecte en faveur de la théorie volcanique. Platon (fig. 3) est rempli de cette espèce de matériau sombre que nous connaissons maintenant comme étant des coulées de lave. Le cratère Alphonse, site d'alunissage de Ranger 9, a un grand pic central et de plus petits cratères entourés d'un halo sombre sur son plancher. Alphonse ressemble fortement à de nombreuses grandes caldeiras terrestres. L'origine volcanique possible d'Alphonse fut renforcée en 1958 quand l'astronome russe N. A. Kozyrev (1908 - ?) découvrit ce qui pourrait être du gaz volcanique incandescent sortant du pic central.

Les canyons qui s'étirent en serpentant sur la Lune, appelés « sillons sinueux » (Photo 4), sont un autre aspect du sol lunaire qui a été à l'origine de théories qui se concurrencent. L'une d'elles suggérait que ces sillons étaient de vrais lits de rivières, formés dans le passé quand la Lune avait pu avoir de l'eau brièvement. Une autre proposait que les sillons avaient été creusés par des coulées de

19. Une caractéristique des études lunaires a été de permettre à chaque théoricien d'interpréter toute nouvelle observation en fonction de sa propre théorie, si bien qu'un seul résultat (comme par exemple les images de Ranger 7) peut être invoqué pour soutenir n'importe quelles théories contradictoires. Ce phénomène, qui existe aussi dans d'autres domaines scientifiques fut mis en évidence par H. C. Urey dès le début du Programme Apollo, phénomène auquel on a donné plus ou moins formellement le nom de « Loi de Urey ». voir R. S. Lewis, « The voyages of Apollo » (New York : Quadrangle, 1974) pp. 13, 57, 133.

20. La formation d'un cratère d'impact par une grande météorite est beaucoup plus compliquée que ne la laissait croire l'expérience faite par Hooke (qui consistait à laisser tomber des billes dans de l'argile mouillée). Un corps qui heurte la Terre ou la Lune file à 10 ou 20 kilomètres par seconde. A une telle vitesse, l'énergie cinétique du corps (égale à la moitié du produit de sa masse par le carré de sa vitesse, $\frac{1}{2}mv^2$) équivaut à plusieurs fois l'énergie dégagée par l'explosion d'une même masse de TNT. En réalité, la formation d'un cratère ne résulte pas, de prime abord, de la pénétration du projectile, mais de la libération soudaine de toute l'énergie de l'onde de choc qui creuse le cratère, écrase et fait fondre la roche cible. Cela a deux conséquences importantes. Premièrement, même de petits corps font de grands cratères. Le projectile qui forma Copernic était probablement large d'environ 2 kilomètres (une taille assez commune pour un astéroïde), mais son impact délivra l'énergie d'une bombe à hydrogène d'un million de mégatonnes et forma un cratère de 90 kilomètres de diamètre. Deuxièmement, des impacts à trajectoire oblique provoquent aussi des cratères circulaires car l'action de l'énergie libérée n'est pas grandement affectée par l'angle sous lequel le projectile heurte la surface.

cendres volcaniques contenant des gaz et produites par de violentes éruptions. Une troisième théorie, également volcanique, suggérait que les sillons étaient des canaux et chenaux le long desquels s'écoulèrent des rivières de lave fondue sur la surface des « mers », et ayant fait issue de cheminées s'enfonçant dans la Lune.

Et l'on ne s'accordait pas non plus sur la nature des « mers » sombres. Elles ne pouvaient pas avoir été de réels océans ; et de nombreux scientifiques pensaient qu'elles étaient composées de coulées de lave basaltique. D'autres explications possibles avançaient qu'elles étaient des sédiments sombres qui avaient été déposés dans des « mers » lunaires ayant existé brièvement il y a longtemps ou bien que les « mers » étaient remplies par des couches de fine poussière sur plusieurs kilomètres d'épaisseur, à l'intérieur desquelles, fut-il prétendu d'ailleurs, s'enfonceraient sans laisser de traces aussi bien astronautes que modules. Un très gros vaisseau robot fut utilisé et qui permit de **(page 62)** finalement réfuter cette dernière idée avant que des hommes n'arrivent réellement sur la Lune.

En 1957, quand l'ère spatiale fut inaugurée avec le lancement du satellite russe Spoutnik I, les connaissances sur la Lune avaient atteint la limite imposée par les observations faites à partir de la Terre. Toute nouvelle avancée dans l'étude de la Lune imposerait quelque chose de nouveau dans l'histoire de la science : un énorme et suprême effort pour étudier la Lune à courte distance, afin de mettre des instruments sur la surface, et pour rapporter ses roches sur Terre aux fins d'analyses.

Le soutien pour l'exploration de l'espace et les alunissages venait de nombreux secteurs de science, chacun étant intéressé par différentes questions fondamentales. Les géologues, incapables de découvrir l'histoire des premiers temps de notre propre planète, regardaient vers la Lune comme un lieu où la trace « originelle » pouvait avoir été conservée. Les astronomes intéressés par l'origine du système solaire voulaient aussi plus d'information sur la Lune. Pour eux, la Lune était un site possible pour installer une plate-forme d'observation au dessus de l'atmosphère obscure de la Terre, même un petit télescope sur la Lune pouvait voir aussi bien que le 200-inch (508 cm) du Mont Palomar sur la terre. A leur tour les physiciens voulaient utiliser la Lune comme une base pour l'observation directe de la matière et de l'énergie qui traversent l'espace, alors que jusqu'ici, ils avaient seulement pu observer leurs effets secondaires dus à l'interférence de notre atmosphère protectrice. Et les biologistes qui sont toujours intéressés par l'origine de la vie sur Terre et la possibilité de vie ailleurs, se demandaient si la Lune abritait de la vie aujourd'hui, ou si elle en avait jamais abrité dans le passé, ou bien encore si ses roches contenaient des substances qui, ayant bénéficié de temps et d'un environnement plus propice, auraient pu donner la vie.

Les scientifiques pouvaient parler facilement des nouvelles connaissances pouvant être acquises en allant sur la Lune, mais personne ne pouvait évaluer ce que la décision d'aller sur la Lune impliquerait. Envoyer des hommes sur la Lune serait difficile, compliqué, probablement dangereux et certainement coûteux. Il n'était pas question de système de propulsion miraculeux, **(page 63)** de scientifiques brillants mais misérables construisant des vaisseaux spatiaux dans des sous-sols et des arrière-cours. Le Programme Apollo demanderait les ressources combinées du gouvernement, de la science et de la technologie, mobilisés à une échelle qui écraserait la construction des pyramides et des grandes cathédrales du Moyen Age. Et le peuple américain et ses représentants élus devraient être

suffisamment enthousiastes pour le programme afin de payer l'addition.

Pendant une dizaine d'années, le Programme Apollo demanda une somme d'efforts humains plus impressionnants que l'Homme n'avait jamais fournis. Il entraîna des constructions massives et de grandes villes sortirent des marécages du Texas et le long des plages de Floride.

Il bénéficia des ressources scientifiques de 120 universités et des capacités techniques de 20 000 firmes américaines. A son apogée il employa directement un demi million de personnes et indirectement, procura en plus du travail à plusieurs millions. Son produit phare, le vaisseau Apollo/Saturne, avait plus de 100 mètres de haut, pesait plus de 2 millions ½ de kilogrammes au moment du lancement, et contenait 15 millions de pièces détachées.

Il était difficile d'être neutre à propos de cette « marche » vers la Lune. A la fois, les implications philosophiques et les retombées économiques compliquées étaient trop importantes pour être ignorées. Les gens furent soit totalement pour le Programme Apollo ou totalement contre lui. Il fut salué comme le plus grand événement depuis que les ancêtres de l'homme rampèrent hors de l'océan sur la Terre ferme, mais en même temps, il fut dénoncé comme un tour de force technologique inutile et tourné en dérision car manquant aussi bien de caractère philosophique que poétique.

Le Programme avancerait le savoir-faire technique américain d'une manière jamais atteinte auparavant sans la pression d'un conflit majeur. Il devait produire des ordinateurs perfectionnés, de nouveaux instruments médicaux, des techniques perfectionnées de production et d'organisation, néanmoins il fut aussi dénoncé comme n'ayant pas de « résultats pratiques ».

(page 64) Bien que des centaines de milliers- peut-être des millions- de personnes furent employées par le Programme Apollo, il fut critiqué parce que le budget considérable qu'il reçut aurait pu être utilisé pour la distribution de services sociaux.

Le Programme Apollo a coûté aux Américains moins du cinquième de leurs dépenses en cigarettes et boissons alcoolisées pendant cette seule période, mais beaucoup de ses détracteurs disaient que nous ne pourrions pas le financer²¹. L'argent ne fut cependant pas le seul coût de l'opération. Trois astronautes perdirent la vie dans un incendie du vaisseau spatial au sol, trois autres furent tués lors de chutes d'avions en cours d'entraînement. Des centaines de jeunes hommes et femmes anonymes passèrent leurs années les plus productives en frustrations, réalisant des cartographies de sites d'alunissage qui ne furent jamais choisis, construisant des équipements qui ne furent jamais utilisés, et s'entraînant pour des missions qui n'eurent jamais lieu. Des milliers d'autres travaillèrent dans l'isolement, et au plus près de la folie, ne voyant peut-être même jamais toute l'étendue du Programme, réalisant des millions de petites tâches qui devaient bien être faites, et cependant continuellement conscients de la faible marge d'erreur ou d'ignorance qu'autorise l'exploration de

21. Le coût du Programme Apollo a été estimé entre 25 et 40 milliards de dollars pour la décennie 1960-1970. Pour une population américaine d'environ 200 millions de personnes, le coût annuel du Programme Apollo fut de moins de 20 dollars par personne. Pendant cette même décennie, l'américain moyen dépense aussi chaque année plus de 80 dollars en cigarettes (environ 4 000), plus de 50 dollars en bière (environ 95 litres), et plus de 50 dollars en boissons alcoolisées (environ 8 litres). (Données du « Statistical Abstract of United States - U. S. Bureau of the Census (Washington, D. C., 1971) pp 374, 701-2).

l'Univers.

CHAPITRE QUATRE

LE COUP D'OEIL AVANT LE BOND

« Je crois que cette nation devrait s'engager à atteindre l'objectif, avant la fin de cette décennie, de faire arriver un Homme sur la Lune et de le faire revenir sur Terre sain et sauf. Aucun projet spatial durant cette période ne sera plus impressionnant pour l'humanité ou plus important pour l'exploration de l'espace à long terme. Et aucun ne sera aussi difficile ou coûteux à accomplir ».

L'orateur était le Président John F. Kennedy ; il annonça sa décision d'exécuter le Programme Apollo à l'occasion de la séance du Congrès, le 25 mai 1961. A partir de ce jour, la grande curiosité de l'Homme à propos de la Lune devint le moteur d'un effort national majeur.

Il y avait beaucoup de raisons d'entreprendre le Programme Apollo en 1961. Il restaurerait le prestige américain, qui avait été diminué par les succès russes dans l'espace et par l'échec récent et désastreux de la tentative de débarquement américain à Cuba, dans la Baie des Cochons. Cela représenterait une nouvelle impulsion pour la technologie américaine et cela procurerait du travail en période de troubles économiques. Comme cela n'avait jamais été fait, l'idée (**page 66**) d'aller sur la Lune était un défi pour une nation qui voulait être fière de sa capacité à réaliser l'impossible. Et cela apporterait de nouvelles informations sur l'Univers qui n'auraient jamais pu être obtenues sans quitter la Terre. Mais bien que les buts scientifiques aient été seulement une des nombreuses raisons d'être du Programme Apollo, l'apport scientifique fut l'un de ses plus importants résultats.

Les questions longuement débattues sur la nature, l'origine et l'environnement de la Lune prenaient subitement une importance très réelle et très pratique. Les ingénieurs affrontaient la tâche de construire de vrais vaisseaux spatiaux pour transporter des hommes vers la Lune en toute sécurité, les déposer et les ramener sains et saufs et avaient besoin de réponses précises à des questions extrêmement difficiles. La surface de la Lune était-elle couverte de fine poussière sur des centaines de mètres d'épaisseur qui engloutirait ensemble vaisseau spatial et astronautes ? Un homme pouvait-il survivre à la surface de la Lune ? Pouvait-il se mouvoir alentour et travailler ? Quelles étaient les chances de survie en cas d'atteinte par une météorite ? Quelle résistance devrait avoir sa combinaison spatiale pour le protéger tout en lui permettant de se mouvoir ? Les roches lunaires faites de matériaux étranges ne risquaient-elles pas de s'enflammer au contact de l'oxygène de l'atmosphère du vaisseau spatial ?

Les scientifiques avaient leurs propres questions auxquelles il fallait aussi répondre : Où les astronautes se poseraient-ils pour obtenir le plus possible d'informations à propos de la Lune ? Quelles sortes d'observations feraient-ils ? Quelles sortes d'échantillons collecteraient-ils ? Quels instruments seraient installés sur la Lune pour transmettre des informations après le départ des

astronautes ?

Au démarrage du Programme Apollo, une multitude de questions se posaient sans réponses. Malgré des siècles d'étude, nous ne connaissions pas encore grand chose sur la surface de la Lune. Les meilleurs télescopes terrestres ne pouvaient résoudre que des objets d'au moins un kilomètre sur la surface lunaire. Partout, les scientifiques des années 1960 fournirent un effort majeur pour obtenir autant d'informations que possible sur la Lune avant d'essayer d'y envoyer des hommes. Une activité consista en une étude intensive de la Lune à travers des télescopes terrestres. **(page 67)** Une autre série de programmes consista à envoyer des vaisseaux spatiaux robots sur la Lune : les premiers Rangers puis les Orbiters pour photographier sa surface, suivis des Surveyors pour se poser en douceur et tester le déplacement à pied pour les hommes qui suivraient. Les résultats de ce vaste effort collectif détermineraient soit la possibilité d'une mission avec des hommes soit l'abandon de l'idée car jugée trop dangereuse. Ces travaux étaient aussi utiles pour déterminer quel équipement serait nécessaire, quel sorte d'entraînement serait demandé aux astronautes et où ils pourraient se poser sur la Lune.

Pendant que ces études étaient faites, des scientifiques étudiaient également les volcans terrestres et les cratères d'impact terrestres de météorites afin de les comparer aux structures semblables de la Lune. Alors que ce travail se poursuivait, les astronautes travaillaient côte à côte avec des géologues pour apprendre à observer, décrire et récolter des échantillons de roches, pratiquant sur la Terre le travail qu'ils auraient à faire un jour sur la Lune.

CARTOGRAPHIE PAR TÉLESCOPE

La Lune et les planètes ont été grandement ignorées par les astronomes pendant la première moitié du vingtième siècle. Il y avait plusieurs raisons à cela. D'abord, la Lune avait été cartographiée aussi bien que possible avec les télescopes existants, et les planètes étaient encore plus difficiles à observer. De plus, les découvertes révolutionnaires en spectroscopie et physique atomique avaient ouvert des possibilités enthousiasmantes pour l'étude de la composition et des mouvements des étoiles et galaxies éloignées, si bien que, lorsque de nouveaux grands télescopes furent construits, ils furent destinés à l'univers lointain au lieu de l'être à la Lune plus familière. Et enfin, l'image de l'astronomie planétaire venait d'être ternie par la controverse étalée sur la place publique à propos de la vie sur Mars.

(page 68) La discussion commença bien innocemment en 1877, quand l'astronome italien Giovanni Schiaparelli (1835-1910) rapporta l'existence d'un réseau de lignes à la surface de Mars. Schiaparelli ne suggérait pas que ces aspects, qu'il appelait « canali », ne fussent autre chose que naturels, mais le mot « canali » (signifiant canaux) fut traduit quelque peu librement par d'autres par « canaux », laissant supposer qu'il s'agissait de constructions artificielles. Plusieurs astronomes et parmi les plus connus, l'américain Percival Lowell (1855-1916), voyaient les canaux comme un grand réseau d'irrigation installé par des Martiens intelligents pour transporter l'eau depuis les pôles vers l'équateur. D'autres astronomes avançaient avec vivacité l'argument selon lequel les canaux étaient soit naturels soit une illusion d'optique, ou simplement n'existaient pas du tout. Comme l'observation de Mars était à la limite du pouvoir de résolution des télescopes existants, les résultats paraissaient

subjectifs -soit fortement influencés par les petits changements dus à l'atmosphère terrestre soit par les particularités individuelles de l'œil et de l'esprit de l'observateur. Deux observateurs ne voyaient pas la même chose et les différentes estimations du nombre de « canaux » variaient de zéro à plusieurs centaines et au delà. La discussion s'atténua par la suite et fut définitivement close lorsque la sonde Mariner eut observé Mars de façon rapprochée. Des observations rapprochées de Mars par des sondes automatiques n'ont révélé aucun canal quel qu'il soit. Des photographies prises pendant des survols de Mars en 1965 (Mariner 4) et 1969 (Mariner 6 et 7) et une photographie panoramique réalisée grâce à la mise en orbite autour de Mars de Mariner 9 en 1971 montrent des cratères, des volcans, des canyons, des traînées produites en surface par le vent, mais il semble maintenant clair que les réseaux intriqués de lignes décrits par Schiaparelli et Lowell n'ont jamais existé. Plus vraisemblablement, ce fut une illusion d'optique due à la propension de l'œil à percevoir des lignes reliant plus ou moins des points et des taches, tels que ceux qui se dessinent réellement à la surface de Mars. En d'autres termes, (pour paraphraser un astronome) les canaux furent fabriqués par des êtres intelligents, mais l'intelligence se trouvait à l'autre extrémité du télescope.

(page 69) Malheureusement pour nous, au début du siècle, quand la dispute à propos des canaux était à son comble, son importance fit que de nombreux jeunes astronomes évitèrent ce créneau de l'astronomie planétaire apparemment controversée et indigne et les dirigea vers le sujet plus enthousiasmant et accessible des étoiles et des galaxies. Pendant près d'un demi siècle, l'astronomie fit l'impasse sur notre propre système solaire dans sa course aux confins éloignés de l'univers.

Néanmoins quelques astronomes continuaient à « cartographier », étudier et méditer à propos de la Lune durant les années « pré-Apollo ». L'un d'eux était l'astrophysicien Ralph B. Baldwin (1912- ?) qui présenta avec deux ouvrages, « The face of the moon » (1948) et « The measure of the moon » (1963), une synthèse d'observations lunaires, des études théoriques et une information géologique qui représentaient une contribution majeure pour notre compréhension de l'origine et de l'histoire de la Lune.

Baldwin apporta la preuve que les cratères lunaires ont pour origine l'impactisme, faisant une comparaison très rapprochée entre eux et les cratères fossiles de météorites qui venaient juste d'être retrouvés sur Terre. Il soutenait que la Lune était un ancien monde dont les continents fortement « cratèrisés » gardaient l'empreinte d'un bombardement primaire intense qui pouvait avoir été le dernier événement au cours de la formation de la Lune. Il suggérait que la Lune s'était développée comme une planète différenciée chimiquement au point d'avoir produit différentes sortes de roches. Et il proposa l'hypothèse que les « mers » sombres étaient composées de couches de basalte qui s'étaient répandues à l'intérieur de bassins formés antérieurement par les impacts cataclysmiques d'énormes astéroïdes de dizaines de kilomètres de diamètre.

Le travail de Baldwin sur la Lune était fait parallèlement à une carrière à plein-temps de vice-président de « l'Oliver Machinery » à Grand Rapids dans le Michigan. Bien qu'il ne devint jamais une personnalité du Programme Apollo, il vit ses idées « redécouvertes » et amplement confirmées chaque fois qu'une mission Apollo rapportait de nouvelles informations sur la Lune.

Un autre événement marquant de la période « pré-Apollo » fut la publication de **(page 70)** « The

Planets », ouvrage écrit en 1952 par H. C. Urey, qui fut Prix Nobel 1934 pour sa découverte de l'hydrogène « lourd ». Urey étudiait le système solaire d'un point de vue théorique, démontrant que les lois de la physique et de la chimie offraient une base de travail pour la compréhension du mode de formation et d'évolution des planètes. Tout à coup, alors qu'elles étaient des objets dont l'histoire pouvait être déchiffrée avec précision, les planètes redevenaient un centre d'intérêt. La Lune devint spécialement importante, car Urey suggérait qu'elle était un objet primordial, froid et inchangé depuis la formation du système solaire, une « Pierre de Rosette » pour la compréhension du reste du système solaire.

Avec la naissance du Programme Apollo, des télescopes furent de nouveau braqués vers la Lune en vue d'un développement avancé de la cartographie géologique de surface. La majeure partie de ce travail fut réalisée par des géologues de l'U. S. Geological Survey's Branch of Astrogeology à Flagstaff en Arizona. Ces géologues commencèrent à observer la Lune au moyen de la vieille Lunette de Lowell de 38 centimètres, celle-là même qui avait servi au moment de la controverse sur Mars il y a plus d'un demi siècle. Avec l'adjonction d'un télescope moderne de 76 centimètres en 1964, le programme de cartographie s'accéléra.

Les fondements de ce travail ont été établis par E. M. Shoemaker et ses collègues de l'U. S. Geological Survey. Dans un bref article publié en 1962, remarquablement intitulé « Base stratigraphique de l'échelle de temps lunaire », Shoemaker voulait montrer que les principes déjà utilisés pour la géologie terrestre pouvaient être appliqués avec quelques modifications à la Lune ²².

Ces principes étaient assez simples, et des géologues commencèrent à les appliquer. Il avait été évident dès le départ, que la Lune était divisée en deux régions principales : les « continents » plus clairs, accidentés, fortement cratérisés et les « mers » plus sombres, plus plates et moins cratérisées. Mais avec une utilisation plus soigneuse (**page 71**) du télescope, il devint apparent que les deux régions contiennent de nombreuses sortes de différentes roches, chacune d'elle étant nettement distincte dans son aspect, par la couleur, par la quantité de lumière réfléchie et par le nombre et la taille des cratères à s'être formés à leur surface. Une carte géologique de la face visible de la Lune, faite à partir de ces observations, divisait la surface de la Lune en environ 20 sortes de roches différentes, alors même que la composition chimique et l'origine de ces roches restaient incertaines.

Une fois que ces différentes formations rocheuses furent identifiées, les géologues tentèrent de différencier les plus anciennes des plus jeunes, si bien qu'ils purent assembler des unités individualisées pour reconstituer une histoire de la Lune. Bien que des observations télescopiques seules ne puissent pas déterminer les âges précis des roches lunaires, elles peuvent être utilisées pour estimer les âges relatifs des différents éléments rocheux. Une règle de base de géologie tant terrestre que lunaire, est que les plus jeunes couches de roches se sont déposées au dessus des plus anciennes. Par exemple, les raies brillantes du cratère Copernic (voir photo 2) se sont déposées au dessus et autour du cratère Eratosthène moins brillant. Il en résulte que Copernic est le plus jeune des deux

22. E. M. Shoemaker et R. J. Hackman, « Stratigraphic Basis for Lunar Time Scale », dans « The Moon » (New York : Academic Press, 1962), pp. 289-300.

cratères. Une autre application simple de ce principe géologique sur la Lune est illustrée par de nombreux cratères situés à la périphérie des « mers » et qui ont été inondés ou partiellement comblés par le matériau sombre des « mers ». Dans ces cas, ces cratères doivent être plus anciens que le matériau sombre qui les a remplis.

Certains géologues pensent que presque tous les cratères lunaires furent creusés par des impacts de météorites. D'après eux, la Lune est continuellement bombardée par de nombreuses particules dont la taille peut varier d'un petit objet moins gros qu'une tête d'épingle à des astéroïdes de plusieurs kilomètres de diamètre. Les plus petits corps sont plus nombreux et frappent la Lune continuellement ; les plus grands sont plus rares et heurtent la Lune seulement une fois par périodes de quelques millions d'années.

Un effet de ce bombardement continu par de petites particules est d'éroder les contours pointus de cratères plus grands récemment formés (**page 72**) et de détruire progressivement les raies brillantes qui les entouraient à l'origine. Avec la poursuite de ce processus, les plus vieux cratères deviennent plus estompés, flous et effacés. Des cratères tels que Eratosthène, qui sont relativement émoussés et sans système de raies visible, sont donc estimés être plus anciens que les cratères à bords pointus, peu érodés, à système de raies comme Copernic et Tycho.

Ce bombardement météoritique offre aussi un moyen unique pour mesurer les âges relatifs des éléments rocheux et des cratères sur la Lune. Plus un élément rocheux est exposé longtemps à des impacts continus à la surface de la Lune, plus il y aura de particules le frappant et plus nombreux seront les cratères à sa surface. Donc les formations les plus anciennes sur la Lune auront plus de cratères que les jeunes. Ainsi les continents fortement « cratèrisés » sont considérés comme étant significativement plus anciens que les « mers » moins cratèrisées. Des subdivisions plus détaillées de la Lune pouvaient être faites grâce aux décomptes de cratères et des formations d'âges apparemment différents purent être différenciées même au sein des continents et des mers eux-mêmes.

Quant à l'autre partie de la controverse, des scientifiques qui sont en faveur de l'origine volcanique des cratères lunaires, font valoir que les âges respectifs des formations lunaires ne peuvent pas être définis avec précision grâce au dénombrement des cratères, parce que ceux-ci pouvaient s'être formés pendant des épisodes isolés de volcanisme plutôt que par un processus continu agissant sur toute la surface lunaire. Pour aller à l'encontre de cet argument, les « impactistes » font valoir que la cohérence générale de la méthode des « âges en fonction du nombre de cratères » avec d'autres observations géologiques est une preuve supplémentaire en faveur de la théorie des impacts. En tous les cas, le comptage de cratères est une donnée objective qui peut être utilisée pour tester aussi bien la théorie des impacts que la théorie volcanique dès lors que les âges des roches lunaires rapportées sur terre sont évalués. Si les âges calculés par les tenants de la théorie des impacts se révélaient être complètement faux ou contradictoires, alors la théorie de l'impact serait elle-même en difficulté.

Les grands cratères lunaires, cependant, apportent un moyen de contrôle que la plupart des géologues, à la fois « impactistes » et « volcanistes » pourraient accepter. Il est clair que quelque fût l'origine des grands cratères (**page 73**) et même des grands bassins²³ de « mers », leur formation fut

23. Une distinction importante est faite entre les « mers » lunaires et les bassins de mer qui les contiennent. Le terme

un événement soudain et cataclysmique pendant lequel une grande quantité de matériau fut éjectée en dehors du cratère et répandue à travers la surface de la Lune d'un seul coup. Le matériau éjecté des grands cratères (ejecta) peut s'être déposé sous forme d'une couche distincte reconnaissable à des centaines de kilomètres autour du cratère ; une telle couche peut être l'unique témoin d'un seul épisode sur de larges zones de la Lune.

En utilisant ces principes, des géologues ont établi des cartes de la surface et ont proposé des sites d'alunissage possible pour les futures missions spatiales habitées. Par exemple : la carte de la région du Sillon Hadley, publiée par le « U. S. Geological Survey » en 1966, décrivait les sites géologiques qui seraient échantillonnés par les astronautes d'Apollo 15 cinq années plus tard ²⁴.

La Rainure Hadley et les Monts Apennins tout proches sont situés sur le bord de Mare Imbrium, qui est la région sombre de 1 600 kilomètres de diamètre qui forme l'œil droit de « L'Homme dans la Lune ». De nombreux scientifiques spécialistes de la Lune, parmi eux Baldwin, Urey et Shoemaker ont suggéré que le Bassin de Mare Imbrium fut formé lorsqu'un énorme astéroïde d'environ 100 kilomètres de diamètre percuta la Lune. Cette catastrophe forma un énorme cratère de plusieurs centaines de kilomètres de diamètre (le bassin Imbrium) et répandit un épais manteau de matériau maintenant appelé la Formation Fra Mauro, (**page 74**) sur presque toute la face visible de la Lune. Comme les effets de cet événement ainsi nommé Imbrium peuvent être retrouvés sur une aussi grande partie de la Lune, l'Événement Imbrium est utilisé comme l'« année zéro » de l'histoire lunaire. A partir de là toutes les roches lunaires sont datées comme « pré-Imbrium » ou « post-Imbrium ».

Sur la carte géologique du site d'alunissage d'Apollo15 (photo 5) le bord de Mare Imbrium va de la partie supérieure droite à la partie inférieure gauche, et la surface de la « mer » s'étire vers la partie supérieure gauche. Avec un télescope, les géologues différencièrent quatre formations différentes et estimèrent leurs âges relatifs. Les roches les plus anciennes, désignées « pré-Imbrium » forment des montagnes hautes, accidentées (les Apennins) qui s'élèvent juste en dehors de Mare Imbrium (en bas et à droite de la carte). On pense que les montagnes ont été soulevées très brusquement sous l'effet de la force de l'impact qui est à l'origine du Bassin Imbrium.

Après l'événement cataclysmique « Imbrium », de nombreux autres cratères assez grands se formèrent dans cette région. L'un d'eux, Archimède, est le grand cratère en haut et à gauche de la carte. Autour d'Archimède se trouve un halo de matériau (coloré en gris sombre sur la carte) qui fut éjecté lors de la formation du cratère. Cette couche, ou « couverture d'ejecta », devait être originellement étendue tout autour d'Archimède, mais une partie est maintenant recouverte par les

maria est utilisé pour désigner des parties de la Lune recouvertes par un matériau sombre qui a, maintenant, été identifié comme étant des coulées de lave basaltique. Un *bassin de mer* est la dépression, peut-être de 10 à 20 kilomètres de profondeur et de centaines de kilomètres de largeur, qui contient le matériau sombre des « mers ». La formation du bassin « marin » s'est faite en premier, et le bassin fut rempli plus tard par des coulées de lave sombre formant la « mer » elle-même. Ainsi, Mare Imbrium désigne la région circulaire sombre de la Lune, alors que le Bassin Imbrium représente la grande dépression circulaire qui la contient.

24. R. J. Hackman, Geologic Map of the Montes Apenninus Region of the Moon (U. S. Geological Survey Map i-463 (LAC-41), 1966).

roches (montrées en teinte plus claire sur la carte) qui ont depuis rempli le Bassin Imbrium.

Nous savons qu'Archimède doit être plus jeune que l'événement Imbrium, sinon il aurait dû être détruit pendant le cataclysme. De la même manière, Archimède doit être plus ancien que les roches qui couvrent le manteau d'ejecta autour du cratère et qui inondent le cratère lui-même.

Ces observations nous racontent quelque chose de très important sur l'histoire de la Lune : la formation de l'énorme Bassin Imbrium et l'inondation du bassin par le matériau sombre de « mer » n'ont pas pu se produire d'un seul coup. Suffisamment de temps pour former de grands cratères comme Archimède a dû s'écouler après l'Événement Imbrium avant que le Bassin Imbrium et ces plus jeunes cratères (**page 75**) soient recouverts par les roches sombres qui constituent maintenant Mare Imbrium.

Les observations télescopiques seules ne peuvent pas déterminer quand se formèrent les différentes structures ou combien de temps s'écoula entre l'événement Imbrium et les évolutions ultérieures. Mais l'histoire géologique de la région du Sillon Hadley, déduites des observations faites à partir de la Terre fut confirmée de manière saisissante quand des échantillons lunaires furent rapportés par Apollo 14 et 15. En 1971, la mission Apollo 14 échantillonna la formation Fra Mauro, située dans une autre partie de la Lune. A partir de ces échantillons, des géologues montrèrent que l'événement Imbrium se produisit il y a environ 3,9 à 4 milliards d'années. Les échantillons d'Apollo 15 provenant du Sillon Hadley comprenaient les roches sombres recouvrant Mare Imbrium et le cratère Archimède. Ces roches furent identifiées comme étant des coulées de lave basaltique et datées de 3,2 à 3,3 milliards d'années. Ces résultats indiquent que le hiatus entre la formation du Bassin Imbrium et les dernières coulées de lave dans Mare Imbrium fut d'environ 700 millions d'années, soit près de 10 fois l'espace de temps séparant les Dinosaures et les Hommes.

La carte du site d'alunissage d'Apollo 15 montre aussi de nombreux canyons allongés et sinueux (sillons sinueux), qui traversent l'étendue de Mare Imbrium. Les règles de base de la géologie montrent que les canyons ont dû se former plus tardivement que les roches solides à l'intérieur desquelles ils ont été creusés, mais l'âge exact des canyons eux-mêmes n'est pas connu. Les résultats de la mission Apollo 15 suggèrent que ces sillons sont des canaux d'alimentation dans lesquels de la lave s'écoula vers la surface de Mare Imbrium. Si cette interprétation est correcte, alors les sillons ont dû se former pendant le remplissage de Mare Imbrium et, aussi bien les sillons que les coulées de lave ont pratiquement le même âge, soit 3,2 à 3,3 milliards d'années.

Les plus jeunes formations sur la carte sont des cratères épars qui se sont formés sur les roches « pré-Imbrium » les plus anciennes et sur les coulées de lave plus jeunes sur Mare Imbrium. Ces cratères sont identifiés comme étant les plus récemment formés car chacun d'eux est entouré d'un halo de matériau d'ejecta, et ni les cratères (**page 76**) ni leur halo n'ont été recouverts par des roches plus jeunes. Les cratères ont probablement été créés à différentes périodes pendant les trois derniers milliards d'années. Leur âge exact reste inconnu.

Alors que le télescope était en cours d'utilisation pour « cartographier » la géologie de la Lune et pour rassembler les éléments de son histoire, trois différentes sortes de sondes spatiales automatiques furent lancées pour nous donner aussi un aperçu plus rapproché de la Lune et pour recenser les risques des sites d'alunissage possibles.

RANGER

A la fin des années 1950, les Russes devançaient nettement les Etats-Unis en envoyant des vaisseaux spatiaux non habités vers la Lune. En 1959, ils touchaient au but avec succès grâce à deux vaisseaux spatiaux, Luna 1 et Luna 2, qui atteignaient la Lune. Peu après, en Octobre 1959, un vaisseau spatial muni d'appareils photographiques, Luna 3, fit le tour de la Lune et envoya par radio les premières vues de la face cachée, jamais observée par l'Homme.

Les images de Luna 3 furent un grand pas en avant dans l'observation de la Lune et elles représentaient un important élan pour l'exploration ultérieure. Bien que leur qualité fut médiocre en comparaison des images obtenues plus tard, elles montraient clairement la surface de presque toute la face cachée de la Lune avec un aspect brillant, fortement cratérisé semblable aux continents de la face visible. Il y avait de nombreux grands cratères, mais seulement quelques zones de matériau sombre de « mers ». Certaines mers et certains cratères étaient suffisamment nets pour que l'on puisse leur donner des noms, particulièrement Mare Moscovienne (la Mer de Moscou) et le cratère Tsiolkovsky.

Contrairement à ces succès russes, le programme américain d'exploration de la Lune (**page 77**) avançait mal, allant de frustration en frustration. Trois essais de lancement de sonde spatiale en orbite autour de la Lune échouèrent complètement en 1959 et 1960 avant que ne commence le Programme Ranger en 1961 ²⁵.

Le vaisseau spatial Ranger fut construit pour obtenir des vues rapprochées de la surface lunaire de meilleure qualité que celles obtenues à partir de télescopes terrestres. Le vaisseau spatial était destiné à voler directement vers la Lune et à transmettre des images TV rapprochées de sa surface avant de s'écraser dessus à pleine vitesse. Au départ, le Programme a souffert d'une série d'échecs décourageants. Après des tests de Ranger 1 et 2 en orbite terrestre en 1961, Ranger 3 fut lancé vers la Lune en Janvier 1962. De façon inattendue, sa fusée de troisième étage fut défectueuse, lui faisant manquer la Lune. Trois mois plus tard, Ranger 4 fut lancé, mais le contrôle radio fut perdu et il s'écrasa sur la face cachée de la Lune, devenant malgré tout le premier objet américain à toucher la surface lunaire. En Octobre 1962, Ranger 5 subit une perte de puissance en cours de route et fut propulsé à côté de la Lune sur une orbite autour du soleil. En Janvier 1964, Ranger 6 fit un alunissage parfait à seulement 32 kilomètres de l'endroit visé, mais la caméra TV avait cessé de transmettre avant même l'arrivée du vaisseau sur la Lune et aucune image ne parvint.

Bien que le Programme Ranger ait débuté par des échecs, il se termina par trois succès étonnants. En Juillet 1964, Ranger 7 s'écrasa à seulement 16 kilomètres de sa cible dans Mare Nubium (Mer des Nuages). Les caméras de télévision fonctionnèrent parfaitement ; 4 316 photographies rapprochées de

25. Ces premiers essais, réalisés avec le petit vaisseau spatial Pioneer ne doivent pas être confondus avec le grand succès du programme Lunar Orbiter réalisé plus tard en 1966-1968.

la Lune furent renvoyées sur la Terre, et des scientifiques en extase eurent vite fait de nommer le lieu d'alunissage Mare Cognitum (La Mer de la Connaissance). En Février 1965, Ranger 8 renvoya 7 137 images avant de s'écraser à la surface de Mare Tranquillitatis à seulement 23 kilomètres du lieu visé (à 68 kilomètres de ce qui devait devenir, **(page 78)** avec l'alunissage d'Apollo 11, la base de la Tranquillité). Seulement un mois plus tard, Ranger 9 réalisa un tir parfait en plein dans le mille dans le cratère Alphonse, renvoyant par radio 5 814 images avant de s'écraser à moins de 5 kilomètres du lieu prévu près du pic central du cratère.

Les photographies de Ranger multiplièrent notre connaissance de la surface de la Lune par 1 000. Dorénavant des blocs de pierre et des petits cratères de moins d'un mètre de large devenaient accessibles. A cette petite échelle, la surface de la Lune apparaissait lisse et doucement ondulante ; il n'y avait ni à pics, ni plates-formes rocheuses ou grands blocs de roche dénudée. La surface apparaissait comme une couche de décombres recouvrant tout ce qui représente le socle rocheux lunaire sous jacent.

Ce qui surprit la plupart des scientifiques à propos des images de Ranger fut qu'elles révélaient une Lune beaucoup plus fortement cratérisée qu'elle n'était apparue depuis la Terre, avec des milliers de cratères dont la taille pouvait varier de quelques centaines de mètres de largeur à des creux tout juste visibles de moins d'un mètre de large. Les plus petits cratères semblaient pour de nombreux scientifiques apporter la preuve évidente d'un bombardement continu de la Lune, parce qu'ils avaient juste la bonne taille pour avoir été formés par des météorites de la taille d'une noix ou d'un pamplemousse, celles-là mêmes qui produisent les étoiles filantes lorsqu'elles pénètrent l'atmosphère terrestre et se consomment.

Ranger 9, le dernier des missions Ranger, saisit quelques vues panoramiques spectaculaires au moment de plonger dans le cratère Alphonse. Le fond du cratère Alphonse est grêlé de milliers de petits cratères, prouvant que le bombardement par de petites particules a aussi bien eu lieu sur cette partie de la Lune. De plus, Ranger 9 prit aussi quelques gros plans qui surprenaient en montrant que des volcans auraient pu se former à l'intérieur du cratère. Ils comportaient un certain nombre de cratères de petite taille, entourés d'un halo sombre et d'où auraient pu sortir des gaz volcaniques.

Avant le lancement du premier Ranger, des scientifiques avaient espéré que les premières images en gros plan de la Lune auraient résolu la plus grande partie des discussions à son propos. Il en a été tout autrement. **(page 79)**. La « loi d'Urey » continuait d'opérer et chaque scientifique trouvait dans les nouvelles images quelques aspects qui confortaient son propre point de vue sur ce que la Lune pouvait être. Mais Ranger apporta vraiment une grande quantité d'informations importantes et concrètes. Il montra que la Lune était fortement cratérisée et qu'une grande partie de la surface lunaire était une plaine lisse, ondulante et grêlée. Et ce qui est encore plus important, il montrait que si la surface était suffisamment résistante pour le supporter, un vaisseau spatial *pourrait* se poser sur la Lune.

SURVEYOR

L'étape suivante fut de construire un vaisseau spatial qui pourrait se poser intact pour prendre des photographies et déterminer les propriétés physiques de la couche de surface. Un engin d'alunissage

en douceur était un vaisseau spatial de loin plus compliqué que les Ranger. Il portait un réacteur puissant qui était mis à feu lorsque le vaisseau approchait de la Lune, le ralentissant pour qu'il se pose en douceur sur la surface lunaire.

A ce stade de l'exploration lunaire, les États Unis étaient encore à la traîne de l'Union Soviétique. Le Luna 9 russe se posait sans encombres sur la Lune le 3 Février 1966, transportant un ensemble d'instruments dans un emballage en forme de balle métallique qui s'ouvrait comme les pétales d'une fleur, portait une caméra et la pointait vers le panorama lunaire environnant. Les images qu'il renvoya montraient une vue de ce qui était apparemment un champ de décombres rocheux. Ceci fut important parce que Luna 9 s'était posé avec fermeté sur la surface et ne montrait aucune tendance à s'enfoncer et à disparaître, preuve qu'au moins dans une partie de la Lune, la couche de surface était assez résistante pour supporter un engin.

Le programme spatial des États Unis rattrapa son retard rapidement. Le 2 Juin 1966, le premier vaisseau spatial du nouveau Programme Surveyor se posa doucement sur la surface d'Oceanus Procellarum (l'Océan des Tempêtes), mit ses caméras de télévision en action et commença à transmettre vers la Terre des images de la surface de la Lune sur laquelle il reposait solidement. Pendant ces quelques premières minutes, **(page 80)** Surveyor 1 remplit pleinement les principaux buts de sa mission. Il prouva que la surface lunaire pourrait supporter un engin lourd ou un homme. L'alunissage de Surveyor 1 montrait que le sol lunaire pourrait supporter des poids d'environ 350 grammes par centimètre carré ; la couche de surface était aussi résistante qu'une plage de sable humide ou qu'un champ labouré, et des hommes et des engins pourraient y voyager en sécurité.

#####

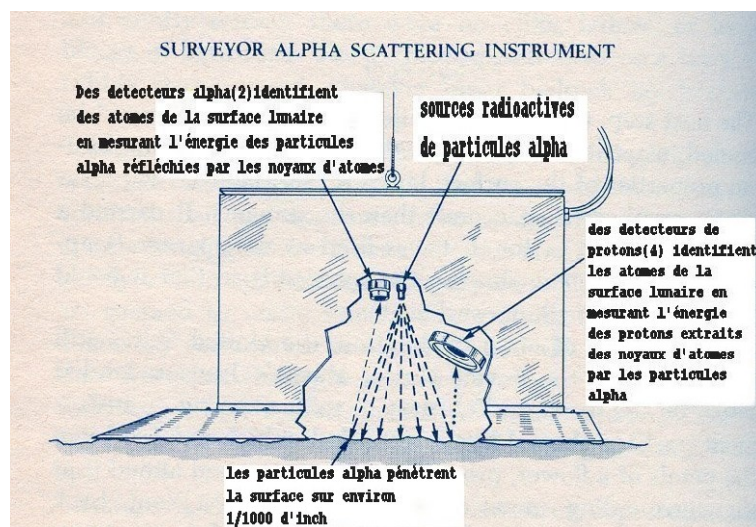


Figure B [de la page 80]. L'analyse de la Lune. L'équipement utilisé par le vaisseau spatial Surveyor pour procéder à des analyses chimiques de la surface lunaire est montré par cette vue en coupe. A l'intérieur d'une boîte plaquée or, qui est descendue sur la surface lunaire au bout d'un câble, se trouvent six sources radioactives qui irradient la surface lunaire de particules alpha (noyaux d'hélium). Les particules alpha bombardent les atomes du régolite et rebondissent vers les détecteurs de la boîte. D'autres détecteurs captent des protons (noyaux d'hydrogène) qui sont expulsés des atomes de

régolite par les particules alpha. A partir des enregistrements des deux sortes de détecteurs, il est possible de calculer la composition chimique du régolite en dessous de l'instrument. (D'après la photographie de la NASA 67-H-1184).

Les plans pour l'envoi (**page 81**) d'hommes sur la Lune prirent un nouvel élan de confiance. Les images de Surveyor1 montraient aussi un lieu intéressant avec des roches et des morceaux de pierre étalés tout autour attendant d'être récoltés. Jusqu'à ce que le temps d'activité de la caméra soit épuisé, Surveyor1 avait transmis 11 237 images, sur lesquelles apparurent des morceaux de pierre d'un mètre de long et des cailloux de quelques millimètres de diamètre seulement.

Le Programme Surveyor fut de loin plus réussi que le Programme Ranger. Sept vaisseaux spatiaux furent lancés, et cinq se posèrent intacts sur la Lune. Ensemble, ils renvoyèrent près de 100 000 photos en gros plan de la surface lunaire. Les images de Surveyor procurèrent une augmentation de la résolution 1 000 fois plus grande que celle des images de Ranger ; elles montraient clairement de petits cratères, des cailloux et des grumeaux de sol lunaire de l'ordre du millimètre. Certains Surveyor creusèrent des tranchées et remuèrent le sol lunaire au moyen de pelles articulées, confirmant la résistance du sol et exposant aux caméras de télévision la nature des premiers centimètres du sol en dessous de la surface.

Surveyor 5 se posa en toute sécurité sur la surface de la Mer de la Tranquillité le 11 Septembre 1967. Peu après l'alunissage, les commandes radio de la Terre faisait descendre du vaisseau spatial une petite boîte plaquée or vers le sol pour commencer la première analyse chimique de la surface d'une autre planète. A l'intérieur de la boîte se trouvait une toute petite quantité d'un élément radioactif artificiel qui émettait des particules alpha ²⁶.

Alors que les particules alpha irradiaient les atomes beaucoup plus grands dans le régolite en dessous de la boîte, elles étaient diffractées dans toutes les directions, comme un jet d'eau éclabousse quand il arrive sur un tas de roches dispersées. Certaines des particules alpha étaient renvoyées dans la boîte ou un détecteur les enregistrait (figure B : voir plus loin). Plus les atomes de régolite sont lourds, (**page 82**) plus les particules alpha sont réfléchies. A partir de la quantité de particules alpha récupérées dans la boîte, les scientifiques calculaient le poids des atomes composant le régolite, et à partir de leur poids, les éléments eux-mêmes pouvaient être identifiés.

Au bout de 900 heures de cette expérience, assez de données avaient été rassemblées pour arriver à certaines conclusions sur la composition de la Mer de la Tranquillité. Le régolite de cette partie apparut être plus ressemblant au basalte terrestre que n'importe quel autre type de roche ou de météorite. La composition chimique du régolite était la suivante : oxygène, 58% ; silice, 19% ; aluminium, 7% ; magnésium, 3% ; plus 13% d'éléments plus lourds que cette expérience ne put déterminer (principalement du fer et du titane, en l'occurrence). Ces premières analyses chimiques de

26. Une particule alpha, composée de deux protons et deux neutrons, est un noyau d'atome d'hélium. Des particules alpha sont des produits habituels de la désintégration d'éléments radioactifs naturels ou artificiels tels que le thorium, l'uranium et le plutonium. Les particules alpha, pour l'expérience de Surveyor 5 étaient obtenues à partir d'un élément radioactif artificiel, le curium 242.

la Lune révélèrent que ses roches étaient très ressemblantes à celles de la Terre. Les résultats de Surveyor 5 (confirmés plus tard par les analyses en laboratoire des échantillons récoltés par Apollo 11 deux ans après en 1969) portèrent un coup fatal à l'idée selon laquelle la Lune était un objet primitif inerte, d'une composition totalement différente de la Terre.

Les analyses chimiques faites par Surveyor 6 dans une autre partie de « mer », Sinus Medii, montra aussi une composition semblable au basalte. Surveyor 7, dont la destination était les continents lunaires, toucha le sol près du cratère Tycho ; le régolite qui fut analysé était en partie originaire de la couverture de matériau éjecté du cratère. Dans ce matériau continental, des scientifiques trouvèrent plus d'aluminium et moins de métaux lourds tels que le fer et le titane par comparaison avec ce qui avaient été trouvé dans les « mers ».

Les découvertes géologiques du Programme Surveyor furent des points de repère. Le vaisseau spatial Surveyor apporta la première preuve directe d'une parenté chimique entre la Lune et la Terre. En confirmant que les régolites de « mers » étaient semblables aux basaltes terrestres, les expériences de Surveyor prouvaient que la Lune n'avait pas de rapports avec les météorites primitives ; elles renforçaient (**page 83**) le point de vue opposé qu'elle était une planète évoluée par l'historique du changement de sa composition chimique. Le Programme montra aussi que les mers et les continents étaient chimiquement différents, sous-entendant que la Lune n'était pas une planète uniforme. Les résultats techniques de Surveyor furent également importants. Les alunissages réussis, les images et les tranchées creusées dans le sol lunaire dissipèrent les doutes sur l'impossibilité pour la surface lunaire de supporter un vaisseau spatial habité.

ORBITER

Pendant que le vaisseau Surveyor était en train de creuser et d'analyser le régolite, un autre vaisseau spatial était en orbite autour de la Lune dans le but de réaliser un relevé photographique de sa surface. Le but du Programme Lunaire Orbiter était de fournir des photographies haute résolution de plusieurs sites sur des « mers » lunaires où le premier alunissage habité pourrait être fait. Ces photographies haute résolution précises étaient suffisamment détaillées pour montrer des blocs de pierre et des cratères de quelques mètres de diamètre seulement. Elles furent examinées en même temps par des scientifiques et des ingénieurs pour évaluer les risques et pour repérer les aspects géologiques importants.

Bien que les russes aient continué à photographier la Lune depuis le lancement de Luna 3 en 1959 avec un autre vaisseau spatial, ce premier travail fut supplanté par le flot d'images de grande qualité à haute résolution transmises par les Orbiters. Le programme fut l'un des plus réussis dans l'histoire de l'exploration spatiale. Cinq vaisseaux spatiaux furent lancés et tous les cinq fonctionnèrent parfaitement. Le programme commença par le lancement d'Orbiter 1 le 10 août 1966, et finit le 31 janvier 1968, quand Orbiter 5, une fois sa mission terminée, fut dirigé sur la Lune pour s'y écraser afin de le faire sortir de la trajectoire des missions Apollo à venir. Les résultats obtenus à partir du Programme Orbiter pendant ces 18 mois dépassèrent de loin tous les espoirs et les attentes des planificateurs.

Le but originel du projet, le relevé en gros plan de huit sites d'alunissage possibles, fut réalisé

pendant les 3 premières missions Orbiter. **(page 84)** Cette efficacité permit aux Orbiter 4 et 5 de rapporter une cartographie lunaire et des observations scientifiques du reste de la Lune.

Plus des 95% de la surface de la Lune furent photographiés par les vaisseaux Orbiter. Les milliers d'images renvoyées pourraient remplir une énorme pièce. Elles apportèrent assez d'informations pour occuper les scientifiques pendant de nombreuses années.

Certaines images d'Orbiter étaient suffisamment spectaculaires pour faire changer l'idée que les gens se faisaient de la Lune. Avec un recul de quelques centaines de kilomètres au dessus de la Lune, les appareils photographiques d'Orbiter montraient de larges étendues de surface lunaire qui se fondaient dans le lointain avec la courbure de l'horizon lunaire. Il était difficile de regarder ces images et de considérer encore la Lune comme un objet du ciel lointain et incompréhensible. Nombre de ces panoramas d'Orbiter sont devenus des portraits classiques de l'Ere spatiale. Une photographie saisit la vaste étendue de l'Océan des Tempêtes avec ses plaines plates, horizontales et ses rides irrégulières en formes de crêtes. Une autre montre une vue en contre-plongée du cratère Copernic avec le curieux cratère Fauth en forme de trou de serrure, situé au premier plan. Et ce qui fut appelée « l'image du siècle », prise par Orbiter 2, montre le cratère Copernic vu par dessus ses remparts (photo 6), révélant le pic central ainsi que ses terrasses dont la hauteur est deux fois celle du Grand Canyon.

Lorsque les Orbiters volèrent à plusieurs reprises au dessus de la face cachée de la Lune, ils renvoyèrent des images claires et fines de choses qui n'avaient jamais été vues auparavant. Mare Orientale (la Mer de l'Est) à peine visible depuis la Terre, chevauche la limite entre les faces visible et cachée de la Lune. Sur les photographies d'Orbiter, avec leur nouveau point de vue, Mare Orientale apparaît comme une énorme cible avec ses cercles concentriques de 900 kilomètres de diamètre environ. Des études géologiques indiquent que cette structure est la plus jeune des grands bassins de « mers », même plus jeune que Mare Imbrium, dont l'origine est le point de repère dans l'échelle du temps lunaire. Curieusement, bien que la Mer Orientale soit presque aussi grande que le Bassin Imbrium, il ne contient pratiquement **(page 85)** pas de lave sombre à l'exception d'une zone un peu inégale près du centre. Pourquoi Mare Imbrium et les autres bassins de « mer » furent inondés de lave alors que Mare Orientale ne le fut pas ? Cette question reste encore sans réponse.

En examinant les photographies d'Orbiter, les scientifiques découvrirent qu'il y a de grands bassins circulaires comme Imbrium et Orientale sur les deux faces de la Lune. En fait de nombreux grands bassins furent découverts aussi bien sur la face cachée de la Lune que sur la face visible. Cependant, les bassins de la face cachée ne contiennent presque pas de lave sombre comme celle qui inonda les bassins de la face visible. Ce matériau de « mer » sombre est donc presque entièrement limité à la face visible de la Lune. La face cachée de la Lune, révélée en détails par les Orbiters, se présente comme des continents fortement « cratérisés » avec seulement quelques zones éparses de matériau sombre. Une pastille sombre dans le cratère Tsiolkovsky (photo 7) a environ 250 kilomètres de diamètre. Tsiolkovsky peut être un exemple de Mare Imbrium en miniature - un grand cratère circulaire formé par un impact de météorite et rempli plus tard par des coulées de lave.

Les images d'Orbiter ont alimenté la controverse à propos de l'impactisme de météorites et du

volcanisme sur la Lune. De nombreux cratères récemment photographiés furent certainement formés par un impact, mais d'autres images montrent des aspects rappelant le volcanisme. Les Marius Hills, près du grand cratère Marius (photo 8) apparaissent comme un groupe de dômes volcaniques arrondis, peu élevés, avec de possibles coulées de lave très différentes de quelque chose formé par un impact météoritique. L'aspect visuel d'un volcanisme relativement récent des Marius Hills est tellement impressionnant que la région fut envisagée comme un site d'atterrissage pour Apollo 17.

Comme cela arrive souvent dans le domaine scientifique, un des principaux résultats du Programme Orbiter fut inattendu et dû au hasard. La vitesse et la localisation des cinq Orbiters, alors qu'ils tournaient autour de la Lune, étaient mesurées avec précision et en continu par les scientifiques sur terre, grâce à des systèmes de surveillance radio. Une analyse soigneuse des données montra, de façon tout à fait surprenante, que les vaisseaux spatiaux ne tournaient pas d'un mouvement uniforme autour de la Lune. Leur vitesse moyenne (**page 86**) était de plusieurs milliers de kilomètres par heure, mais quelquefois ils accéléraient de façon inopinée et à d'autres moments ils ralentissaient. Ces changements de vitesse étaient légers (quelques mètres par seconde seulement ou environ 0,1 pour cent de leur vitesse orbitale) mais ils étaient suffisants pour exciter la curiosité.

Par la suite, un modèle fut trouvé pour expliquer ces variations. Chaque fois qu'un Orbiter s'approchait d'une des « mers » circulaires à matériau sombre de la face visible de la Lune, sa vitesse augmentait ; quand il avait dépassé la « mer », il ralentissait. Les scientifiques en conclurent qu'il y avait une certaine masse supplémentaire sous les « mers » qui augmentait un peu le champ gravitationnel de la Lune, faisant ainsi varier la vitesse des vaisseaux spatiaux. Cette masse supplémentaire attirait l'Orbiter vers la « mer » lors de son approche puis le ralentissait une fois qu'il s'éloignait.

La découverte imprévue de ces concentrations de masse supplémentaire (le terme fut transformé en une abréviation : *mascons*) provoqua de grandes discussions. Par la suite, douze de ces mascons furent trouvées sur la face visible de la Lune. (L'existence de mascons sur la face cachée n'a pas pu être établie avec certitude car les vaisseaux Orbiter ne pouvaient pas être suivis lorsqu'ils étaient derrière la Lune). Chaque mascon était associée à une « mer » sombre circulaire telle que Mare Imbrium, Mare Serenitatis ou Mare Crisium ; aucune mascon ne fut identifiée au niveau de la grande étendue irrégulière de coulées de lave sombre représentée par Oceanus Procellarum.

L'existence de mascons montrait que les roches situées sous les « mers » devaient être plus denses et plus lourdes que les roches qui les entourent. Les scientifiques furent surpris de trouver un excès de masse sous les « mers », qui étaient les endroits les moins élevés et les plus plats sur la Lune et plusieurs théories furent proposées pour expliquer le phénomène. Une explication fut que les mascons provenaient des restes d'astéroïdes géants qui s'étaient écrasés sur la Lune et avaient formé les bassins de « mers ». D'autres scientifiques suggéraient que les mascons auraient pu être dues à la présence d'une couche de basalte d'environ 5 à 10 kilomètres d'épaisseur dans les « mers », mais à condition que le basalte (**page 87**) ait été 10 % plus dense que les roches constituant les continents lunaires les entourant. Cette seconde théorie fut fortement renforcée par la nature et les propriétés des échantillons rapportés par les missions Apollo elles-mêmes.

Sans se soucier de la nature exacte des mascons, leur seule présence montrait quelque chose d'important sur l'intérieur de la Lune. Chacun s'accordait pour admettre que les mascons étaient des structures proches de la surface et qu'ils étaient aussi anciens que les « mers ». Cela signifie que l'intérieur de la Lune était assez résistant pour avoir supporté les mascons depuis longtemps, probablement depuis quelques milliards d'années. Si l'intérieur de la Lune avait été fragile et malléable, l'excès de masse se serait enfoncé lentement dans la Lune et n'aurait pas été détectable lors du survol des vaisseaux spatiaux.

Pour de nombreux scientifiques, la présence persistante des mascons implique un intérieur de la Lune résistant et rigide. Comme les roches et les autres matériaux solides perdent leur résistance lorsqu'ils sont chauffés, un intérieur rigide signifie donc un intérieur relativement froid. Les températures internes de la Lune ne doivent pas maintenant dépasser quelques centaines de degrés Celsius, de loin en dessous du point de fusion des roches lunaires. Les Orbiters lunaires qui avaient pour but uniquement de « cartographier » la surface de la Lune, avaient donné fortuitement certaines informations importantes sur l'intérieur de la Lune.

Dix ans de préparation et d'effort aboutirent à leur apogée en quelques mois en 1968 et 1969. Apollo 8, lancé le 21 décembre 1968, transportait Frank Borman, Jim Lovell et William Anders vers la Lune et sur une orbite lunaire²⁷. Ils devinrent les premiers humains à entrer dans le champ de gravité d'une autre planète et les premiers à voir la Terre se lever au dessus de la surface d'un autre monde. Leur voyage procura un réveillon mémorable, lorsque des images télévisées de la surface de la Lune furent relayées vers la Terre pendant que les astronautes lisaient un extrait du Livre de la Genèse à leurs auditeurs d'une distance de près de 400 000 kilomètres. . . .

Trois mois plus tard, en mars 1969, James Mc Divitt, David Scott et Russell Schweickart, dans Apollo 9, testèrent le système complet d'Apollo en orbite autour de la Terre. En mai 1969, Apollo 10 transportait Eugene Cernan, John Young et Thomas Stafford vers la Lune pour une « répétition en costume » qui comportait chaque partie de la mission lunaire sauf le véritable alunissage. Cernan et Stafford firent voler leur Module Lunaire au plus près de la Lune comme aucun homme ne l'avait encore jamais approchée, volant aussi près de la Lune qu'un avion au dessus de la Terre. Le succès d'Apollo 10 effaça les dernières incertitudes sur un alunissage. Avant même le retour sur Terre des astronautes, Apollo 11 avançait vers son pas de tir.

Le 16 juillet 1969, trois hommes attendaient le décollage dans Apollo 11 ; deux d'entre eux marcheraient sur la Lune.

A 9 h 32 du matin, l'ordre fut « Go ! ».

27. Apollo 1, 2 et 3 furent des missions automatiques en 1966 pour tester des éléments séparés du système des vaisseaux complets Apollo. Apollo 4, 5, et 6 en 1967 et début 1968, furent des tests automatiques plus complexes. Apollo 7, lancé le 11 octobre 1968, fut la première mission habitée, transportant trois astronautes et testant le système de vaisseau spatial en orbite autour de la terre. Apollo 8 fut la première mission lancée réellement vers la Lune.

CHAPITRE CINQ

« ICI LA BASE DE LA TRANQUILLITÉ » : L'HOMME SUR LA LUNE

Peu après 4 h 17 de l'après-midi, heure locale à l'Est, le 20 juillet 1969, le Module lunaire Eagle Apollo 11 se posait doucement sur la surface de la Lune pour mettre un nouveau nom sur la paysage lunaire, la Base de la Tranquillité. La technologie qui amenait des hommes sur la Lune offrait aussi au monde entier la possibilité de voir par la télévision, les premiers pas de Neil Armstrong et Edwin Aldrin sur la Lune quelques heures plus tard.

Depuis la Terre, environ 500 millions de téléspectateurs observaient les images des hommes au moment où ceux-ci marchaient sur la Lune. Beaucoup de gens trouvèrent l'événement difficile à croire, même en le regardant se réaliser. L'éclairage cru, les ombres nettes, noires, les mouvements lents dans l'apesanteur de la Lune, et l'apparence presque fantomatique des équipements des astronautes donnaient l'impression à de nombreux spectateurs qu'ils étaient en train de regarder un film de science fiction ancien et mal fait au lieu d'assister à l'exploration réelle de la Lune.

Si la première marche sur la Lune semblait irréelle, c'était en partie parce que les spectateurs la voyaient avec les perceptions et les réflexes conditionnés de la vie vécue avec la pesanteur terrestre. **(page 90)** Les enjambées d'allure flottante des astronautes et la lente retombée des jets de poussière provoqués par chaque pas semblaient artificielles et manquant de naturel. Je me souviens très bien d'avoir comparé la silhouette des deux scaphandres à des plongeurs sous-marins, dont les mouvements lents sont familiers et donc « normaux ». Les astronautes d'Apollo 11 s'adaptèrent vite à la gravité lunaire, mais il fallut quelques missions de plus pour faire apparaître ces mouvements flottants plus naturels à nos yeux.

Pour les acteurs du Programme Apollo, l'alunissage fut l'apogée qui justifiait près de dix années d'efforts continus. Pour les spectateurs de la télévision américaine, il y eut l'émotion d'être témoin d'un événement historique majeur ainsi qu'un puissant sentiment de fierté nationale lors d'un succès américain. Mais l'alunissage représentait aussi un plus grand succès pour toute l'humanité. Apollo semblait incompatible avec les frontières nationales qui devenaient étroites. Le drapeau américain placé sur la Lune par les astronautes fut hissé comme un symbole d'exploit, non comme une marque de conquête ou de domination.

La science reprit vite ses droits une fois le drapeau planté sur la Lune. Armstrong et Aldrin commencèrent à rassembler de nouvelles informations à partir du moment où ils se mirent à marcher sur la Lune. Ils testèrent la marche et commencèrent à se déplacer d'abord par sauts prudents puis par

enjambées alertes plus assurées. En quelques minutes, ils se déplaçaient facilement à grandes enjambées. « N'est ce pas drôle ? » remarqua Armstrong.

Ils décrivirent la surface sur laquelle ils se tenaient : une plaine plate, incolore, un sol poudreux parsemé de petits cratères et de fragments rocheux. C'était, dit Aldrin, « une magnifique désolation ». Il n'y avait pas traces de l'action du vent ou de l'eau. Il n'y avait nulle part signe de vie.

Tout ce qu'ils ont vu était nouveau. Ils prirent des photographies en couleur de différents aspects de la Lune qu'aucun homme n'avait jamais vus auparavant : petits cratères, grandes roches se dressant à travers le sol meuble, étranges rides et sillons inexpliqués à la surface et des taches luisantes de verre éclaboussant l'intérieur des cratères et la surface des roches.

Ils récoltèrent les échantillons de roche et de sol qui étaient attendus par un millier de scientifiques sur la Terre (**page 91**). Il s'est avéré qu'Apollo 11 s'était posé à environ 6 kilomètres de l'endroit prévu dans la Mer de la Tranquillité ; personne ne sut exactement où les astronautes s'étaient posés tant qu'ils ne furent pas revenus sur Terre. Mais tout cela ne semblait pas important. Sur la surface plate de la Mer de la Tranquillité, il n'y a pas grande différence d'un endroit à l'autre. Ce qui *était* important, c'est que des roches lunaires avaient été récoltées pour la première fois. Un alunissage de précision pouvait attendre les missions ultérieures.

Une partie de la marche lunaire de deux heures des astronautes fut consacrée à installer des instruments qui apporteraient des informations sur la Lune longtemps après qu'ils l'aient quittée. Une des tâches d'Aldrin fut de transporter deux instruments à environ 10 mètres du module lunaire, en dehors du périmètre du souffle que provoquerait le moteur servant au retour du module, et à les installer.

Un des deux instruments, un sismographe, était une copie des instruments utilisés depuis longtemps sur Terre pour détecter et analyser les vibrations causées par les séismes. Le sismographe apporté par Apollo 11 était assez sensible pour enregistrer tous les tremblements de Lune possibles, et les scientifiques espéraient qu'il leur permettrait de beaucoup apprendre sur la nature de l'intérieur de la Lune. Quand Aldrin mit en route l'instrument, ses signaux radio furent détectés immédiatement par les récepteurs terrestres, transmis par l'intermédiaire du réseau mondial de communications de la NASA, et reçus par les chercheurs principaux du Centre des vols spatiaux habités à Houston au Texas. Le sismographe était assez sensible pour détecter un petit tremblement à des milliers de kilomètres de distance. Pendant la marche sur la Lune, il enregistra fidèlement les petites vibrations des pas des astronautes.

Un autre instrument, le Réflecteur Laser, était un miroir précis qui réfléchirait un rayon laser puissant dirigé vers la Lune à partir d'un télescope pour revenir sur la surface de la Terre. En faisant rebondir le rayon laser sur le réflecteur, les astronomes pouvaient mesurer la distance de la Terre à la Lune avec une précision d'environ 15 centimètres (**page 92**) sur près de 400 000 kilomètres. C'est à peu près 5 000 fois plus précis que ce que peuvent faire les géomètres sur Terre lorsqu'ils mesurent la distance de 5 000 kilomètres entre New York et San Francisco.

En répétant des mesures précises de la distance Terre-Lune pendant les années à venir, les scientifiques pourront suivre les petites variations des mouvements de la Lune au cours de ses rondes

autour de la Terre. A partir des inclinaisons et oscillations presque indécélables au cours de ses mouvements, la nature de l'intérieur de la Lune peut être comprise plus complètement. Il peut même devenir possible d'utiliser les informations inverses, en utilisant les réflecteurs laser de la Lune pour détecter et mesurer les lents mouvements des continents et des bassins océaniques de la Terre.

Un autre instrument installé sur la surface lunaire regarda en direction des étoiles. Apollo 11 avait transformé les souhaits des physiciens et des astronomes en réalité. Maintenant, cette Lune sans atmosphère servait de plate-forme pour voir l'univers plus clairement qu'à travers celle, épaisse et instable, de la Terre. Le premier instrument à profiter de cette nouvelle plate-forme d'observation fut probablement l'outil le plus simple apporté sur la Lune par Apollo 11. C'était une bande de feuille d'aluminium montée sur une perche. Aldrin l'installa en l'enfonçant simplement dans le régolite, en déroulant la feuille d'aluminium et en la tournant face au Soleil (photo 9). Cet instrument, connu officiellement comme l'Expérience de la composition du vent solaire et officieusement comme le « store », était destiné à piéger un échantillon de Soleil lui-même.

Il n'y a pas d'air dans l'espace, mais il y a un « vent ». En plus de la lumière et de la chaleur envoyées à travers le système solaire, le Soleil envoie aussi des jets d'atomes simples qui sont soufflés en dehors de sa haute atmosphère incroyablement chaude et chassés dans l'espace à des vitesses de plusieurs centaines de kilomètres par seconde. Ce jet de particules atomiques, appelé « vent solaire », est un échantillon de la matière dont est constitué le Soleil.

Toute vie sur Terre dépend du Soleil, cependant nous savons très (p.93) peu de choses sur lui. C'est seulement depuis ces cinquante dernières années (ndt : livre écrit en 1977) que nous avons découvert que le Soleil est un réacteur nucléaire géant, consommant ses atomes d'hydrogène pour fabriquer de l'hélium et délivrant une énergie équivalente à l'explosion d'un milliard de bombes à hydrogène par seconde. Même maintenant, alors que nous considérons comme normal que le Soleil soit un objet immuable, nous apprenons lentement que, comme un être humain, le Soleil a une histoire.

Le Soleil est né il y a environ 4 milliards et demi d'années dans le centre chaud du nuage de poussière en cours d'effondrement qui fut à l'origine du système solaire. Il est actuellement à mi-chemin de sa vie, dans un état stable et calme. Dans quelques milliards d'années il va devenir vieux et mourir, peut-être en se refroidissant tranquillement, si bien que toutes les planètes gèleront, ou peut-être en abandonnant son énergie au cours d'une explosion soudaine qui transformera la Terre et les autres planètes en cendres.

Mais la mort du Soleil est moins un souci immédiat que son comportement actuel. Le Soleil fournit l'énergie qui contrôle notre climat et nos saisons. L'existence de la vie sur Terre dépend du fait que la température oscille entre les points de congélation et d'ébullition de l'eau. Une petite augmentation de la production de l'énergie solaire pourrait rendre la Terre trop chaude pour être habitable. Une petite diminution pourrait geler les océans et nous ramener aux âges des grandes glaciations.

Comme un médecin examinant un patient pour évaluer sa santé, les scientifiques ont besoin d'analyser le Soleil pour comprendre les processus qui s'y déroulent, et pour préciser son état de santé, car l'avenir du Soleil détermine notre propre avenir. Avant Apollo, les scientifiques devaient étudier la composition du Soleil indirectement à partir de la nature de sa lumière. Le vent solaire,

composé de réels atomes provenant du Soleil, offre des renseignements que nous ne pourrions jamais obtenir par des observations indirectes.

Cependant, il ne reste rien du vent solaire à la surface de la Terre. A des centaines de kilomètres de hauteur, les particules rapides sont arrêtées par l'atmosphère terrestre et les champs magnétiques et rassemblent leur énergie pour produire les aurores colorées lumineuses que nous appelons les aurores boréales ou australes. Notre atmosphère, qui nous protège de ces « courants » d'atomes, nous empêche aussi d'apprendre à les connaître. **(page 94)**

Donc, pour échantillonner le Soleil, l'homme doit aller sur la Lune. Pendant que les astronautes étaient sur la Lune, le « store » en aluminium piégeait et retenait les atomes du vent solaire qui le percutaient. A la fin de leur séjour, les astronautes enroulèrent la feuille d'aluminium avec ses atomes piégés et les rapportèrent sur Terre pour analyse.

Bien que le vent solaire transporte des atomes de presque tous les éléments présents dans la nature, l'Expérience sur la composition du vent solaire ne put détecter que les éléments, parmi les plus abondants, qui ne réagissaient pas chimiquement avec la feuille d'aluminium, et qui pouvaient être extraits de la feuille par chauffage. Ces limites expliquent que seuls les éléments dits « gaz nobles » purent être analysés. Ainsi de l'hélium et du néon furent trouvés ; alors que de l'argon, du krypton, et du xénon, même s'ils étaient présents, ne purent être détectés. L'hélium, qui est le second élément le plus abondant (après l'hydrogène) dans le Soleil, fut aussi l'élément le plus abondant trouvé dans le « store » ; les scientifiques estimèrent que chaque centimètre carré de la feuille d'aluminium avait été bombardé par 6 millions d'atomes d'hélium environ et 15 000 atomes de néon par seconde.

L'expérience du « store » d'Apollo 11 fut un début important. D'autres feuilles d'aluminium, déployées pendant des missions plus longues, piégèrent plus tard quelques-uns des atomes plus rares dans le vent solaire. Les roches et le régolite lunaires procurèrent des échantillons de vent solaire qui avaient été piégés il y a des milliers ou même millions d'années. Enfin, les scientifiques purent comparer les empreintes passées du comportement du Soleil avec son état actuel. Si nous pouvions imaginer une chronologie à partir des éléments de ces empreintes enregistrées, nous pourrions savoir quelles réactions nucléaires se sont produites dans le passé à l'intérieur du Soleil, quelles transformations sont en cours maintenant, et ce qui pourrait arriver au Soleil dans l'avenir. Les morceaux de Lune que rapporta Apollo 11 furent importants et excitants, mais les morceaux de Soleil qui furent ramenés dans cette fine feuille d'aluminium peuvent s'avérer être encore plus importants.

(page 95)

LE DÉBUT D'APOLLO : EN SE HÂTANT LENTEMENT

Comme les premiers pas d'un enfant, l'alunissage d'Apollo 11 fut un grand événement, mais ce n'était que le commencement car les résultats d'Apollo 11 furent rapidement surpassés par les alunissages suivants (photo10). Avec les missions suivantes, nous avons acquis plus d'expérience dans les voyages spatiaux et plus de confiance dans l'équipement, et nous avons réellement commencé à utiliser le système de transport des Apollo pour explorer la Lune. Chaque nouvelle mission était plus complexe et plus ambitieuse que la précédente, et chaque alunissage apportait de nouveaux instruments sur la Lune.

Persnne n'avait jamais imaginé que la Lune pouvait être étudiée correctement par un unique vol habité. Imaginons un astronaute martien commençant l'exploration de la planète Terre en se posant sur les plaines horizontales du centre du Kansas. Les échantillons qu'il récolterait, procureraient des renseignements d'ordre général sur la planète et ses observations apporteraient aux scientifiques martiens une grande quantité de connaissances pour comprendre ce à quoi les terres arables plates ressemblent. Mais un atterrissage au Kansas n'apporterait rien sur les Rocheuses, les Appalaches, les Grands Lacs ou le désert de Mohave. Si ce programme spatial martien s'arrêtait après un seul atterrissage, leurs scientifiques n'apprendraient rien sur les montagnes, océans, forêts, volcans et glaciers qui sont tellement essentiels pour comprendre ce à quoi ressemble réellement la planète Terre.

Les scientifiques terriens étaient dans la même situation après Apollo 11. Les échantillons ramenés de la Mer de la Tranquillité nous apprirent beaucoup sur les coulées de lave qui couvraient une partie de la Lune. Mais il y avait d'autres régions de la Lune qui nécessitaient encore des recherches et les missions suivantes se concentrèrent sur d'autres « mers », les montagnes arrondies des Apennins près du Sillon Hadley, et les continents escarpés situés près du cratère Descartes.

Quatre mois seulement après les premiers pas sur la Lune, Apollo 12 se posa au point précis prévu sur l'Océan des Tempêtes. Les astronautes Charles Conrad et Alan Bean posèrent (**page 96**) le module lunaire « Intrépide » à moins de deux cent mètres du vaisseau Surveyor 3 qui était là, silencieux, sur la Lune depuis son alunissage il y a 2 ans ½. Les astronautes restèrent sur la Lune pendant plusieurs heures, prenant le temps de faire deux longues marches et récoltant des échantillons suivant le plan prévu. Leurs échantillons venaient de diverses coulées de lave qui étaient à la fois plus jeunes et chimiquement différentes des échantillons rapportés par Apollo 11.

Au lieu de simplement installer quelques instruments isolés, Conrad et Bean déployèrent une station scientifique complète, comportant un second sismographe pour détecter les tremblements de Lune et plusieurs différents instruments destinés à la mesure du champ magnétique faible de la Lune, pour rechercher des traces de molécules de gaz proches de la surface lunaire, et pour enregistrer les bombardements de la Lune par la matière et l'énergie venues de l'espace. La station tout entière avait été prévue et construite avec une telle efficacité qu'elle consommait moins de puissance qu'une ampoule électrique de 100 watts pour réaliser toutes les mesures et les transmettre vers la Terre.

Les astronautes d'Apollo12 avaient pour instructions de ne pas s'éloigner à plus de quelques centaines de mètres de leur module lunaire, afin de pouvoir le rejoindre rapidement en cas de moindre problème du système de refroidissement ou d'alimentation en oxygène de leurs combinaisons spatiales. Mais la précision de l'alunissage d'Apollo 12 permit aux astronautes d'atteindre le vaisseau Surveyor 3 tout proche afin de récupérer sa caméra de télévision (qui avait une lentille de verre) et quelques pièces de métal du vaisseau lui-même, donnant ainsi aux scientifiques la possibilité de découvrir exactement comment se comportaient des pièces de verre et de métal laissées sur la Lune pendant un laps de temps connu.

Un examen minutieux de ces objets n'apporta aucune preuve que même la plus petite météorite ait touché le vaisseau spatial en deux ans et demi. Sur la base de ces résultats, les scientifiques se

sentaient plus rassurés sur le fait que des météorites ne mettraient pas en danger des astronautes, même s'ils devaient rester plusieurs jours sur la Lune. Des biologistes ne trouvèrent aucune trace de vie microscopique (**page 97**) sur les pièces du vaisseau spatial. Finalement, les données acquises à partir de Surveyor 3 furent utilisées pour calculer à quelle vitesse était usée la surface de la Lune bombardée par les particules venues de l'espace. L'érosion sur la Lune se fait incroyablement lentement. Cela prend environ 50 millions d'années pour user la surface lunaire d'un millimètre seulement. Les panoramas de la Lune que nous voyons maintenant existent inchangés depuis des milliards d'années. Comparée à la Terre, où le vent et l'eau peuvent entièrement changer la surface en quelques années, la surface de la Lune semble permanente et pratiquement sans changement.

Un programme scientifique encore plus important fut planifié pour Apollo 13. Malheureusement, la mission frôla le désastre trois jours après le lancement quand un réservoir d'oxygène explosa, privant le vaisseau spatial de sa réserve de puissance et rendant impossible l'alunissage. Tout à coup, le monde entier pris conscience brutalement que, même après deux alunissages réussis, l'aventure spatiale restait dangereuse et imprévisible.

Au moment de l'accident, Apollo 13 était à plus de 320 000 kilomètres de la Terre, plus des trois quarts du trajet de la Terre à la Lune, et le chemin le plus rapide pour revenir fut d'abord de tourner autour de la Lune. Le retour sain et sauf de l'équipage d'Apollo 13 prouvait que hommes et équipement pouvaient faire face à des épreuves inattendues ; l'équipage survécut en utilisant le Module Lunaire comme un bateau de sauvetage, vivant sur la réserve d'énergie et d'oxygène qu'ils auraient utilisés pendant leur séjour sur la Lune. Bien qu'Apollo 13 ne se fut jamais posé sur la Lune, l'équipage obtint quelques excellentes photographies de la face cachée pendant leur ronde avant de commencer leur voyage de retour, images prises par des hommes disciplinés qui n'étaient pas sûrs, à ce moment là, qu'ils reviendraient sur la Terre pour les montrer.

Le programme ambitieux prévu pour Apollo 13 fut exécuté par Apollo 14 en janvier 1971. Les astronautes Alan Shepard et Edgar Mitchell posèrent leur module lunaire « Antares » près du site d'Apollo 12, à proximité d'un grand cratère appelé « Fra Mauro ». Ils effectuèrent une longue traversée à pied parmi des collines arrondies et des champs de galets, vers le bord (**page 98**) d'un petit cratère appelé « Cône ». Ils installèrent une autre station scientifique et ainsi contribuèrent à mettre sur pied un réseau d'instruments d'enregistrement à travers la Lune. Pour la première fois sur la Lune, ils installèrent des écouteurs sensibles, puis provoquèrent de petites explosions sur le sol, pendant qu'ils écoutaient les échos renvoyés par les couches de roches et de régolite situés en dessous d'eux. Ils mesurèrent le champ magnétique lunaire sur la surface, et découvrirent qu'il était beaucoup plus intense que ce que l'on pensait. Finalement, ils rapportèrent des morceaux de cette formation inhabituelle qu'est Fra Mauro, d'étranges roches composées d'un mélange de matériau clair et sombre. (photo 11).

Le retour d'Apollo 14 termina l'ensemble des missions dites « Les débuts d'Apollo ». Ces missions avaient établi que l'équipement d'Apollo pouvait amener des hommes sur la Lune, leur permettre d'y rester et les ramener sains et saufs. Les alunissages avaient aussi montré que des hommes pouvaient marcher et travailler sur la Lune. Les astronautes avaient décrit et photographié la surface de la Lune,

prélevé des roches superficielles, cassé des morceaux de blocs rocheux, carotté le régolite, et installé des instruments scientifiques. En résumé, les missions « Apollo du début » avaient démontré que des hommes sur la Lune pouvaient faire tout ce qui est nécessaire pour une exploration scientifique. (figure C).

De retour sur Terre, les échantillons lunaires fournissaient aux scientifiques un flot continu d'informations sur le grand âge de la Lune, les impacts énormes et les grandes coulées de lave qui ont marqué son histoire. Les idées sommaires que l'on avait antérieurement de l'histoire et de l'origine de la Lune commençaient à se préciser et l'étude globale de la Lune était lancée.

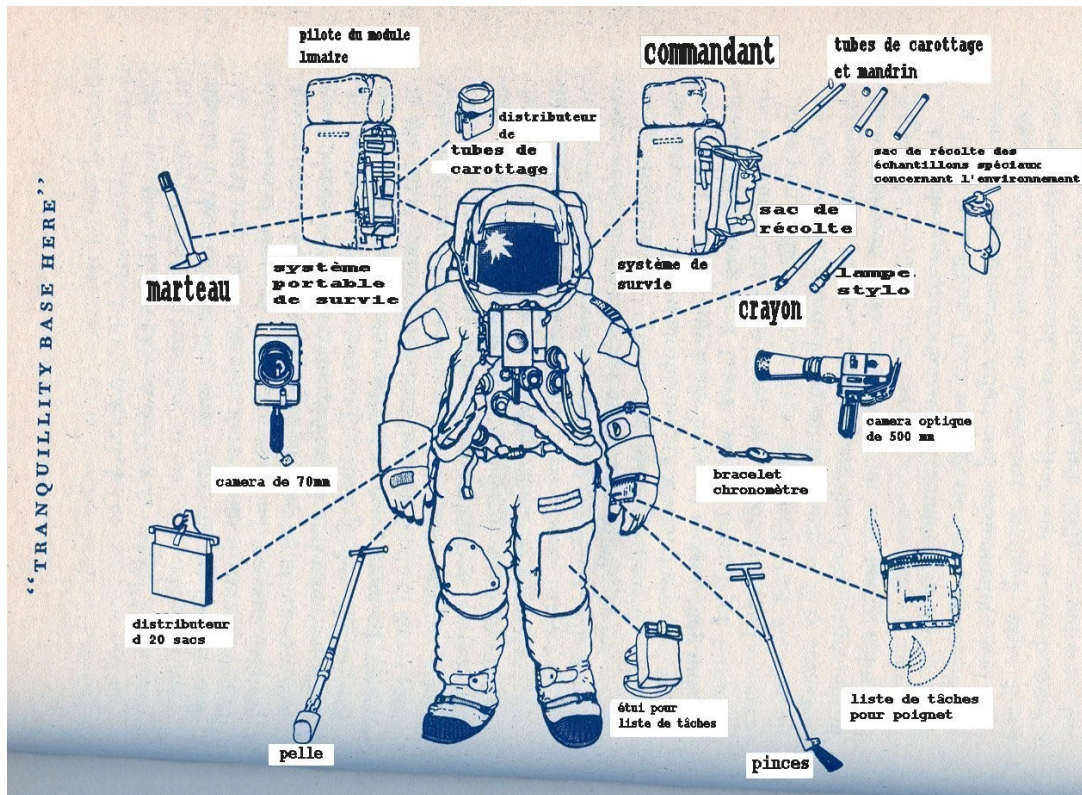


Figure C [de la page 99]. *Habits de travail pour la Lune.* Ce diagramme montre la variété de l'équipement porté par les combinaisons spatiales des astronautes lors de leur exploration scientifique de la surface de la Lune : outils pour la collecte des échantillons, sacs et tubes de carottage pour conserver les échantillons, appareils photos, une montre, listes de tâches à effectuer, et un système portable de survie qui fournit de l'oxygène et refroidit la combinaison. Après la récolte, les échantillons sont transportés dans un sac à dos attendant au système portable de survie jusqu'au retour des astronautes au Module lunaire. (D'après la photographie de la NASA 72-H-180).

FIN DU PROGRAMME APOLLO : CHARGES UTILES ET DÉNOUEMENTS

Apollo 15 apparut simplement comme un nouveau lancement Apollo lorsqu'il partit dans un bruit de tonnerre par un ciel clair au dessus de Cap Kennedy, presque deux ans jour pour jour après que des hommes aient marché pour la première fois sur la Lune. Mais Apollo 15 était la première d'une série de missions qui se focaliseraient entièrement sur l'exploration scientifique prolongée et intensive de la Lune. Pour ces vols, le système d'origine Apollo avait été modifié pour transporter davantage de matériel sur la Lune et rapporter de plus lourdes charges d'échantillons lunaires. La nouvelle mission, préparée en profitant de l'expérience de deux années d'exploration lunaire réussie, amènerait les astronautes sur des sites d'alunissage plus accidentés et difficiles, sélectionnés par des scientifiques impatientes : le Sillon Hadley, la partie continentale de Descartes et la vallée Littrow.

Les explorations réalisées par Apollo 15, 16, et 17 ont permis de confirmer les exploits d'Apollo 11 qui semblaient prudents et hésitants. Ces dernières missions prévoyaient que les astronautes resteraient sur la Lune pendant plusieurs jours au lieu de plusieurs heures. Au lieu de marcher seulement sur quelques centaines de mètres, ils roulèrent sur de nombreux kilomètres dans une « Rover » lunaire. Au lieu de ramasser en vitesse des roches, au hasard, ils firent des observations ciblées de la surface lunaire et utilisèrent leur entraînement en géologie pour sélectionner et identifier les échantillons récoltés. Mission après mission, des centaines de kilos de différentes roches et sols revinrent sur Terre, provenant de nouvelles « mers », sillons et continents.

Toute une nouvelle génération d'instruments arriva sur la Lune lors de ces derniers vols. Chaque mission emportait de quoi réaliser 20 expériences scientifiques différentes. Des sismographes supplémentaires et des réflecteurs laser furent installés sur la surface, élargissant progressivement un réseau couvrant la Lune afin de commencer un sondage de l'intérieur lunaire. Des foreuses électriques purent extraire des carottes de deux mètres de long du sol lunaire, si bien que les scientifiques pouvaient lire (**page 101**) les centaines de millions d'années de l'histoire lunaire conservée dans les fines couches du régolite. Il y avait aussi parmi ces instruments, un appareil important appelé le « Détecteur de Flux Thermique » que les scientifiques espéraient utiliser pour mesurer la température de la Lune et pour répondre à la question si longtemps débattue de savoir si l'intérieur de la Lune est chaud ou froid.

La mesure de la température interne de la Lune fut un des principaux buts du Programme Apollo. Comme la quantité de chaleur interne détermine ce à quoi ressemble une planète, cette information fournit aux scientifiques un indice important concernant sa formation et son évolution. Un corps à faible chaleur interne restera « gelé », alors qu'une planète chaude comme la Terre aura l'énergie suffisante pour engendrer de grands changements provoquant séismes et éruptions volcaniques, édifiant de grandes chaînes de montagnes, mettant en mouvement continents et bassins océaniques sur des plaques géantes.

Il y a plusieurs façons pour que de la chaleur puisse être produite à l'intérieur d'une planète. Une partie de la chaleur peut être produite lorsque la formation de la planète par l'accrétion de petites météorites et de planétoïdes aboutit à l'édification d'un objet plus grand. Alors que la planète devient

plus grande, sa force gravitationnelle augmente. Elle attire d'autres corps avec plus de force, les faisant percuter sa surface à des vitesses de plus en plus élevées. Ces collisions à grande vitesse dégagent une grande quantité d'énergie sous forme de chaleur, qui peut rester dans la partie extérieure de la planète pendant des milliards d'années.

Même après l'arrêt de la croissance de la planète, celle-ci peut encore générer de la chaleur interne. Des matériaux lourds comme le fer en fusion, peuvent passer de la partie externe de la planète vers le centre. Comme ces matériaux passent d'un niveau élevé dans la planète à un niveau inférieur, ils libèrent de l'énergie gravitationnelle, de même que de l'eau abandonne de l'énergie (pour entraîner une roue de moulin ou un générateur) lorsqu'elle s'écoule d'une hauteur vers un niveau plus bas. A l'intérieur d'une planète cette énergie est libérée sous forme de chaleur, et la formation d'un noyau de fer peut libérer assez de chaleur pour faire fondre une grande partie du reste de la planète.

Ces deux sources de chaleur ne peuvent se manifester (**page 102**) qu'au début de l'histoire d'une planète. Si elles étaient les seules sources de chaleur planétaire, alors toutes les planètes se seraient continuellement refroidies depuis environ 4 milliards et demi d'années. Pourtant, il y a une autre source de chaleur interne qui peut être active pendant toute la vie d'une planète. La découverte de la radioactivité, il y a un siècle environ, amena les scientifiques à prendre en compte les quantités significatives de chaleur qui sont libérées par la désintégration lente et régulière des quantités minimales d'éléments radioactifs, tels que l'uranium et le thorium, qui sont présents dans toutes les roches à l'état naturel.

Les hommes savent depuis des siècles que la Terre est chaude en son sein. Les grandes coulées de lave fondue qui s'écoulent sans cesse hors des volcans ont toujours été une preuve impressionnante de la chaleur interne de notre planète. Plus récemment, lorsque des mines profondes furent creusées et des puits de pétrole forés, les hommes découvrirent que plus ils allaient en profondeur plus il faisait chaud. Dans la plupart des endroits la température augmente de 1 à 3 °C tous les cent mètres de profondeur. Les mines les plus profondes du monde (en Afrique du Sud) ont près de 4 kilomètres de profondeur. La température au fond (environ 55 °C ou 130 °F) rend nécessaire la généralisation du conditionnement de l'air.

C'est une loi fondamentale de la nature selon laquelle la chaleur diffuse à partir des objets chauds vers les plus froids. Donc la chaleur diffuse continuellement de l'intérieur de la Terre vers la surface où elle peut être détectée et mesurée par des instruments sensibles.

La quantité de chaleur perdue par la Terre est très petite, seulement quelques millièmes de watt par centimètre carré de surface. Il faudrait, au flux de chaleur terrestre, sans autre interférence, environ cinq années pour fondre un cube de glace à sa surface. Cette minuscule quantité de chaleur, alors, est complètement noyée dans les plus grandes quantités de chaleur fournies à la surface par la lumière solaire et la circulation atmosphérique.

Mais même de minuscules quantités de chaleur sont importantes. Cumulée sur des millions de kilomètres carrés et pendant des milliards d'années, cette chaleur interne est à l'origine des volcans et des séismes qui ont joué un si grand rôle dans l'histoire de la Terre.

(**page 103**) Donc la mesure expérimentale du flux de chaleur à la surface de la Lune apporte un

moyen de sonder l'intérieur de la Lune. Les scientifiques savaient déjà que la Lune avait été chaude il y a environ 3 milliards ½ d'années, quand une partie de la Lune avait fondu et que des flots de lave s'étaient répandus sur les « mers ». Ce qui n'était pas connu, c'était à quelle profondeur de la Lune avait eu lieu cette fusion et si la Lune pouvait être encore partiellement fondue à l'intérieur. Le protocole expérimental « Flux thermique » d'Apollo 15 essayait de répondre à ces questions. En même temps, les résultats apporteraient d'importantes informations d'ordre chimique : à partir de la quantité de chaleur observée, les scientifiques pourraient calculer quelle quantité de matériau radioactif était contenu à l'intérieur de la Lune.

Les mesures de flux thermique sur la Lune étaient réalisées avec les mêmes techniques utilisées depuis des années pour déterminer le flux thermique terrestre dans les mines profondes et dans la vase des fonds marins. Les astronautes d'Apollo 15 firent deux forages de 1 à 2 mètres de profondeur et d'environ 2 centimètres de diamètre dans le régolite. Dans chaque trou de forage, ils descendirent une longue sonde contenant des thermomètres électriques sensibles placés sur toute leur longueur (figure D). Les résultats donnés par les thermomètres révélaient que la température était 1 °C plus élevée au fond du forage qu'à son entrée.

Avant les missions Apollo, les estimations théoriques sur ce que pouvait être le flux thermique lunaire, l'évaluaient en moyenne entre 1 et 5 microwatts par centimètre carré (un microwatt est un millionième de watt). La dispersion des valeurs prédites résultait de la grande variété des composants chimiques supposés à l'intérieur de la Lune. La plus grande valeur était proche du flux thermique moyen de la Terre elle-même, et la plupart des scientifiques, spécialement ceux qui pensaient que la Lune était un corps « froid », s'attendaient à des valeurs beaucoup plus basses que un microwatt ou moins.

Les résultats donnés par les thermomètres de l'instrument de mesure du flux thermique créèrent une grande surprise générale. La Lune était beaucoup plus chaude à l'intérieur que ce à quoi s'attendait la plupart des scientifiques. Les températures de l'intérieur du régolite augmentaient rapidement avec la profondeur, **(page104)** d'environ 1,8 °C par mètre²⁸. Ces mesures, associées à l'information concernant les propriétés thermiques du régolite, ont permis le calcul du flux thermique issu de la Lune. La valeur obtenue était de 3,3 microwatts par centimètre carré, soit environ la moitié de celle de la Terre. **(page 105)** C'est une grande quantité de chaleur à diffuser en dehors d'un corps qui n'a seulement qu'un quatre vingtième du volume de la Terre.

28. Le régolite meuble et poreux est un très bon isolant, c'est à dire qu'il conduit très mal la chaleur. La chaleur s'échappant de l'intérieur de la Lune met donc plus de temps pour passer à travers le régolite que si elle devait traverser une couche d'épaisseur équivalente de roche solide. Il en résulte que la température augmente plus rapidement sous la surface, dans le régolite, (1,8 °C par mètre) que dans les roches terrestres solides (environ 0,03 °C par mètre). La hausse rapide de température doit se produire uniquement dans la couche de régolite, car si la température continuait de monter de façon aussi rapide en allant vers la profondeur, la Lune entière serait fondue à quelques kilomètres sous la surface. Sous la fine couche de surface de régolite, il y a de la roche solide, dans laquelle la température monte beaucoup plus lentement avec la profondeur, de telle manière que même dans la profondeur de la Lune, les températures ne sont probablement pas beaucoup plus élevées que 1000 °C environ.

#####

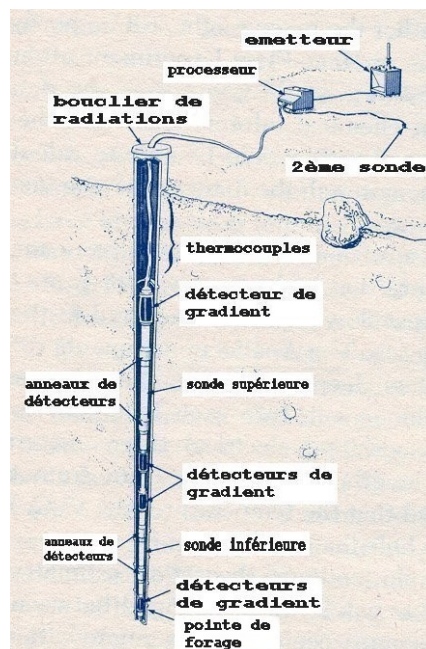


Figure D (page 104). *Prise de la température de la Lune.* Le système de mesure du flux thermique d'Apollo 15 comporte deux sondes qui sont introduites dans des trous de forage du régolite. Une sonde est vue en coupe ; elle a environ 1 mètre de longueur et contient une série de détecteurs pour mesurer les gradients (différences de température) dans le trou.

Naturellement, cette découverte entraîna un flot de nouvelles questions. Comment la Lune pouvait-elle être aussi chaude à l'intérieur alors qu'il n'y avait aucune preuve d'éruptions volcaniques récentes ? Comment la preuve expérimentale d'un intérieur lunaire chaud pouvait-elle se concilier avec la preuve d'un intérieur froid et rigide apportée par la découverte des mascons ? Un modèle de compromis impliquait l'idée d'une Lune « assez chaude », ce qui donnerait satisfaction aux défenseurs de chacune de ces théories. Une telle Lune serait suffisamment chaude à l'intérieur pour engendrer le flux de chaleur observé, mais pas au point de faire perdre sa résistance à la croûte lunaire. Une autre explication suggérée était que les éléments radioactifs producteurs de chaleur avaient été en quelque sorte concentrés dans la couche externe de la Lune alors que l'intérieur était encore froid. Les partisans de cette idée se trouvèrent confrontés à des problèmes quand ils essayèrent d'expliquer comment une telle séparation chimique extrême pouvait s'être produite. Plus de mesures du flux thermique lunaire et plus d'analyses des éléments radioactifs dans les roches lunaires rapportées semblent être nécessaires pour obtenir une explication claire²⁹.

29. Des données plus récentes fournies par les instruments de flux thermique sur la Lune indiquent que la Lune n'est pas tout à fait aussi chaude que ce que nous pensions primitivement. Lors de la 7ème Conférence de Science Lunaire en

(page 106) D'autres instruments transportés par Apollo 15 (et les missions suivantes) tirèrent avantage de la Lune comme d'une plate-forme pour observer le reste de l'univers. De petites caméras télescopiques placées sur la Lune « voyaient » grâce à une lumière pour laquelle nos yeux sont aveugles ; elles détectaient les faibles rayons ultraviolets qui ne peuvent pas traverser l'atmosphère terrestre. Les images nous montraient véritablement les étoiles et la Terre elle-même sous un nouvel éclairage (photos 12 et 13).

Apollo 15 réussit un alunissage parfait dans une région accidentée choisie pour son importance scientifique. Le site d'alunissage était au bord de Mare Imbrium, entre les sommets élevés arrondis des Monts Apennins et le canyon profond sinueux du Sillon Hadley. Avec la « Rover » lunaire, les astronautes Jim Irwin et David Scott firent une vaste étude géologique qui les amena le long du bord du Sillon Hadley et le long du versant des anciennes montagnes qui le surplombent.

Les astronautes observèrent de fins détails que n'avait pas pu détecter la caméra TV de Surveyor. Ils découvrirent et photographièrent les fines stries qui sont inclinées sur le versant des montagnes environnantes. Tout d'abord, les géologues pensaient que ces lignes pouvaient être des couches différentes de roches qui s'étaient déposées horizontalement et puis qui s'étaient redressées et inclinées sous l'effet de l'impact catastrophique qui forma le Bassin Imbrium. Des études ultérieures des images faites par des géologues sur la Terre suggérèrent que ces lignes pouvaient être causées par l'effet de la lumière crue du soleil éclairant la surface lunaire en contre-jour.

Irwin et Scott furent les premiers astronautes à voir le socle lunaire rocheux dur dans sa position originelle dans les murs du Sillon Hadley. Ils photographièrent une portion de couches horizontales de coulées de lave basaltique qui n'avaient pas encore été brisées par des météorites ou enfouies sous le régolite. (page 107) Il était plus évident que le Sillon Hadley pouvait être en fait un énorme chenal à travers lequel la lave fondue sortait à flots vers la Mer des Pluies.

Malgré la quantité de nouveaux instruments transportés par les dernières missions Apollo, les astronautes avaient encore du temps pour récolter et ramener sur Terre, pour les scientifiques impatients, un nombre et une variété croissants d'échantillons lunaires. Les astronautes d'Apollo 15 cassèrent des morceaux des différentes sortes de pierres posées sur la surface. Ils récoltèrent aussi des échantillons de régolite en des points variés le long de leur itinéraire. Ils revinrent sur Terre avec 77 kilogrammes de matériau lunaire et avec plus de 350 échantillons différents. Nombre de ces roches venaient de coulées de lave d'une grande variété de structures et de compositions chimiques. La mission Apollo 15 rapporta aussi l'insolite Roche de la Genèse cristalline (échantillon 15415) qui se révéla être âgée de 4 milliards d'années, ainsi qu'un morceau fragile de matériau lunaire, surnommé

mars 1976, un flux thermique d'une valeur d'environ 2 microwatts fut rapporté. Cette valeur plus basse est plus conforme avec des modèles de Lune « assez chaude ». Les valeurs rapportées à l'origine (environ 3,3 microwatts) étaient la conséquence d'une connaissance imparfaite des propriétés mécaniques et thermiques du régolite ; ces propriétés avaient été modifiées lorsque les astronautes foulaient le sol et introduisaient l'appareil de mesure du flux thermique. Alors que les instruments sont opérationnels en permanence depuis presque cinq ans, les scientifiques ont obtenu suffisamment de données pour corriger cette perturbation initiale du sol et pour mesurer aussi bien le flux thermique que les propriétés du régolite avec plus de rigueur.

la Motte Verte (échantillon 15426), qui était composé de minuscules sphérules de verre de couleur verte, joli et curieux produit de quelque ancien impact ou d'éruption volcanique.

Apollo 16 fut la première mission à explorer les continents lunaires, dans une région proche du cratère Descartes. Les astronautes, John Young et Charles Duke, firent deux longues excursions dans leur Rover lunaire. Tout d'abord, ils se dirigèrent vers le Sud du Site pendant 5 kilomètres et montèrent sur une colline de taille moyenne nommée « Montagne de Pierre ». Leur parcours suivant les amena cinq kilomètres vers le Nord, pour visiter « North Ray Crater » et pour récolter des morceaux de socle lunaire projeté sous l'effet de la force de l'ancien impact qui avait formé le cratère (photo 14).

Les astronautes d'Apollo 16 furent tenus d'échantillonner une sorte de roches nommée « la Formation Cayley ». Des géologues avaient supposé que ces roches pourraient montrer qu'elles étaient issues d'anciennes coulées de lave qui auraient pu s'être déversées sur les continents avant même la formation des « mers ». Ils ne pouvaient pas avoir plus tort. Les astronautes bien entraînés à la reconnaissance en surface reconnurent immédiatement que les roches n'étaient pas des laves. Les échantillons (**page 108**) qu'ils décrivent et récoltèrent étaient des brèches, roches composées de morceaux écrasés et brisés d'autres roches. Aucune trace de coulées de lave ne fut trouvée sur les sites d'échantillonnages d'Apollo 16. Tous les échantillons rapportés étaient des morceaux fondus et pulvérisés de roches continentales.

La formation Cayley, d'où provenaient les échantillons d'Apollo 16, ne semble pas être des coulées de lave, mais une énorme accumulation de débris dus à un grand impact sur la Lune. Certains géologues suggéraient que le grand Bassin de la Mer Orientale était la source de ces roches continentales. Le cataclysme qui forma ce bassin de 900 kilomètres de diamètre pouvait avoir facilement produit l'énergie suffisante pour lancer avec force une couche de roches pulvérisées et fondues sur plus du quart de la circonférence lunaire jusqu'au site Descartes.

La mission Apollo 16 provoqua ainsi une révision majeure de notre image de l'histoire lunaire. Ce qui avait été considéré comme un épisode d'un ancien volcanisme était maintenant reconnu comme un des effets importants d'un impact catastrophique. Cette découverte inattendue nous apprenait même quelque chose de très important : la cartographie télescopique a beau être faite soigneusement, la géologie et l'histoire réelles d'une autre planète ne peuvent être étudiées que par des missions sur place et par échantillonnage de roches. Lors de la mission Apollo 15, les prévisions géologiques ont été largement confirmées grâce aux roches rapportées du Sillon Hadley. Lors de la mission Apollo 16, les résultats furent exactement l'inverse, et la mission nous apprit qu'une certaine prudence sera nécessaire dans l'avenir quand il s'agira d'essayer de déchiffrer l'histoire de Mercure ou de Mars en se basant sur les seules photographies de leurs surfaces.

L'alunissage d'Apollo 17 dans la Vallée Littrow au bord de la Mer de la Sérénité fut une tentative pour trouver à la fois des roches lunaires anciennes et jeunes sur un seul emplacement. La Mer de la Sérénité est un ancien bassin, plus vieux que Mare Imbrium, et les montagnes qui l'entourent pouvaient contenir des roches formées lors des stades les plus anciens de l'histoire lunaire. Cependant, une étude soignée des photographies de la Vallée Littrow faites en orbite par Apollo 15

montrait aussi à quoi ressemblaient des **(page 109)** dépôts de roches volcaniques jeunes. Les plus jeunes laves jusqu'ici rapportées de la Lune étaient âgées d'environ 3,3 milliards d'années. Trouver alors des laves plus récentes serait très important, parce que cela remettrait en cause notre estimation du temps pendant lequel l'intérieur de la Lune était resté fondu.

Les astronautes d'Apollo 17, Eugene Cernan et Harrison (« Jack ») Schmitt, alunirent dans la Vallée Littrow, une petite dépression presque entièrement entourée de hautes collines arrondies. Schmitt était un des nouveaux scientifiques astronautes, un géologue confirmé qui avait abandonné l'étude des anciennes roches de Norvège pour tenter de trouver des roches encore plus vieilles sur la Lune. Lui et Cernan effectuèrent une exploration minutieuse et astreignante, à travers la Vallée Littrow, allant et venant dans tous les sens à bord de leur Rover Lunaire, déployant des instruments, prélevant des échantillons de laves du fond de la Vallée, récoltant des morceaux de volumineux blocs de pierre perchés sur les collines environnantes (photo 15).

Le point culminant de la mission Apollo 17 fut la découverte du spectaculaire régolite Orange sur l'un des petits cratères du fond de la vallée. Jusqu'alors, tous les astronautes avaient vu la Lune comme un lieu aux teintes brunes et grises presque dénué de couleurs vives, uniforme, et la découverte de quelque chose d'un orange brillant était complètement inattendu. Le sol était constitué de jolies gouttelettes de verre clair (photo 16) qui semblaient si fraîches qu'elles pouvaient s'être formées hier. Un moment, les scientifiques excités pensèrent que le Sol Orange était la preuve d'une activité volcanique récente et imaginaient comment les sphérules de verre pouvaient s'être formées dans des fontaines flamboyantes de jeune lave.

Il y eut surprise et une certaine déception quand les échantillons d'Apollo 17 furent examinés à leur retour sur Terre. Aucune roche jeune ne fut trouvée. Les laves provenant du fond de la Vallée Littrow étaient âgées de 3,7 milliards d'années, le même âge que celui des premières roches lunaires rapportées par Apollo 11. Même le Sol Orange qui paraissait si frais, était âgé de 3,7 milliards d'années. Pas plus âgées que les plus âgées des roches trouvées par les autres missions n'étaient les roches récoltées sur les collines. Comme les premières missions, Apollo 17 rapporta **(page 110)** certaines roches dont les âges furent évalués à 4 – 4,3 milliards d'années, mais l'interprétation de ces valeurs est encore incertaine. D'une certaine manière, les missions Apollo étaient revenues au point de départ, avec les plus jeunes roches ramenées par la dernière mission s'avérant être quasiment aussi anciennes que les roches rapportées par la première.

Après le plongeon réussi du Module de Commande « America » d'Apollo 17 dans l'Océan Pacifique le 19 décembre 1972, le Programme Apollo prenait fin. Mais l'étude de la Lune commençait juste. Les 382 kilogrammes de roche lunaire et de régolite rapportés par six missions Apollo réussies devinrent la raison d'un effort scientifique croissant. Nombre d'appareils laissés sur la Lune transmettent encore des données utiles vers la Terre. Un des résultats de ce programme a été de domestiquer la Lune, la transformant en un énorme satellite porteur d'instruments qui est utilisé exactement comme les plus petits satellites construits et lancés depuis la Terre pour en apprendre plus sur l'Univers.

(page 110)

LA SCIENCE VENUE DE L'ORBITE

Une grande part de la recherche lunaire des dernières missions Apollo fut effectuée par des astronautes qui ne mirent jamais un pied sur la Lune. De nombreux nouveaux instruments scientifiques, qui n'avaient pas été utilisés lors des premières missions Apollo, furent installés dans le Module de Commande Apollo, le vaisseau spatial qui transportait un astronaute autour de la Lune pendant que les deux autres travaillaient sur sa surface en dessous de lui.

Bien que le Programme scientifique orbital n'apparaisse jamais sur les écrans des télévisions de salon pendant les marches sur la Lune, ces activités furent quasiment aussi importantes que le travail de surface. Même avec un nombre illimité d'alunissages d'Apollo, l'Homme ne pouvait pas étudier toute la surface de la Lune à pied. Le Module de Commande transportait une batterie d'instruments pour photographier, mesurer et analyser les grandes parties de la Lune que le Programme Apollo n'atteindrait jamais (photo 17).

(page 111) Alors que le Module de Commande était en orbite autour de la Lune à 125 kilomètres au dessus de la surface, il photographiait et analysait la surface lunaire directement en dessous de lui. Comme les orbites de la plupart des missions Apollo étaient proches de l'équateur lunaire, il n'était pas possible d'étudier toute la surface, mais presque un quart de la Lune fut couvert. Apollo 15, 16 et 17 réussirent la tâche impressionnante de photographier et d'analyser une étendue de la Lune aussi grande que les États Unis et le Mexique réunis. Plus important est que la moitié de cette région se situe sur la face cachée de la Lune où l'information scientifique est difficile à obtenir. Le programme expérimental orbital voulait être la première exploration scientifique de la face cachée de la Lune depuis que la région avait été photographiée par les « Lunar Orbiters » plusieurs années auparavant. Il allait aussi être le dernier regard de l'Homme vers cette région avant un certain temps.

Parmi les instruments en orbite se trouvaient plusieurs appareils photographiques qui étaient techniquement de loin supérieurs à ceux utilisés par les « Lunar Orbiters ». Placés près de ces appareils se trouvait un altimètre laser qui envoyait un rayon intense de lumière laser en direction de la surface lunaire. Cet instrument mesurait les hauteurs des montagnes et les profondeurs des vallées avec une précision de moins d'un mètre à une altitude de 125 kilomètres. Les mesures montraient exactement comment la Lune est réellement accidentée. Certaines portions de continents sur la face cachée de la Lune s'élèvent presque à 4 kilomètres au dessus du niveau moyen de la surface. Il y a une dénivellation d'environ 8 kilomètres depuis les sommets des plus hautes montagnes lunaires jusqu'au niveau des « mers ». De plus, certaines « mers » lunaires de la face visible de la Lune furent trouvées avec un niveau situé à 4 kilomètres en dessous du niveau moyen de la surface lunaire.

Une des plus ambitieuses entreprises du programme scientifique orbital fut une analyse chimique de la Lune. Alors que le Module de Commande passait au dessus de la surface de la Lune, ses instruments analysaient aussi les premiers sites d'alunissage Apollo, dont la composition chimique exacte fut connue à partir des échantillons revenus. La combinaison des analyses à partir de l'orbite lunaire avec les **(page 112)** résultats des échantillons Apollo permit aux scientifiques d'étendre les résultats géologiques des alunissages Apollo à près du quart de la surface lunaire.

Pour faire les analyses chimiques, les instruments du Module de Commande utilisaient les rayons X

qui sont émis par le Soleil avec sa lumière et sa chaleur. Les rayons X du Soleil sont très faibles et ils sont facilement arrêtés par l'atmosphère de la Terre, mais ils atteignent constamment la surface de la Lune privée d'atmosphère. Ces rayons X ne sont pas un danger pour un astronaute, car ils sont trop faibles pour pénétrer en profondeur dans tout matériel solide tel qu'une combinaison spatiale. Traversant seulement quelques centièmes de millimètre de l'épaisseur du régolite avant d'être arrêtés, ces rayons X solaires excitent les atomes du régolite et provoquent l'émission de leurs propres rayons X de faible puissance. Chacun des différents éléments chimiques dans le sol émet ses propres rayons X caractéristiques et ces rayons X secondaires repartent dans l'espace. Là haut, au dessus de la surface lunaire, des instruments spéciaux du Module de Commande détectent les différents Rayons X et en font le tri, déterminant ainsi la quantité de chacun des différents éléments du régolite.

Le même principe est utilisé en routine sur Terre dans les sondes à rayons X qui réalisent des analyses chimiques des roches et minéraux. Mais le programme expérimental Apollo utilisait le Soleil comme tube à rayons X et toute la Lune comme une cible. En une orbite de la Lune, ces détecteurs de rayons X obtenaient des informations chimiques d'une partie de la Lune plus grande que celle qui aurait pu être obtenue par des siècles d'alunissages Apollo et d'explorations en surface.

Le plus important résultat de ces analyses chimiques fut de découvrir qu'il y avait des différences chimiques précises entre les « mers » sombres et les zones continentales plus claires. L'origine des couleurs claire et sombre sur la Lune, qui avait été un sujet de spéculation depuis une époque qui remontait à la civilisation ancienne des Grecs, fut finalement établie. Les « mers » et les continents ont des couleurs différentes parce qu'ils sont constitués de roches différentes. Les roches continentales de couleur claire sont riches en calcium et aluminium, (**page 113**) alors que les « mers » sont constituées de roches plus sombres qui sont riches en éléments tels que le magnésium, le fer et le titane. Les continents et les mers sont fondamentalement différents par leur composition chimique et leur origine, et ces différences chimiques existent depuis plus de 3 milliards d'années lors de la formation des « mers ».

Le fait que ces différences chimiques puissent encore être détectées dans le régolite après 3 milliards d'années nous disait quelque chose de plus à propos de la Lune. Les détecteurs orbitaux analysaient seulement la partie superficielle du régolite, une couche de moins d'un dixième de millimètre d'épaisseur. Mais la comparaison des résultats obtenus en orbite avec ceux des analyses des échantillons lunaires rapportés montrait que cette très fine couche de surface présentait fidèlement la plupart des caractéristiques chimiques du socle rocheux sous-jacent. Si des différences chimiques peuvent encore être détectées alors que le régolite s'est formé depuis, c'est que sa partie superficielle n'est pas encore bien malaxée. Si le régolite avait été homogénéisé et réparti sur toute la surface de la Lune, toutes les analyses chimiques faites à partir de l'orbite auraient donné des résultats moyens identiques sans différences fondamentales entre les analyses provenant des continents ou des « mers ».

Ces analyses orbitales confirment ainsi les conclusions des scientifiques qui avaient étudié les morceaux du vaisseau spatial Surveyor 3 ramenés par Apollo 12. L'érosion et l'altération se fait si lentement sur la Lune que même trois milliards d'années ne suffisent pas pour déplacer beaucoup de

régolite d'un endroit de la Lune à un autre.

Pendant que les instruments à Rayons X du Module de Commande analysaient la surface de la Lune, d'autres détecteurs scrutaient la Lune à la recherche de traces de radioactivité. Des éléments radioactifs tels que potassium, thorium et uranium sont essentiels pour notre compréhension de la Lune parce qu'ils sont des sources importantes de chaleur. Ces éléments sont très rares dans les roches lunaires, si rares qu'ils sont généralement mesurés en millièmes d'unité au lieu de centièmes. Mais sur la Lune, comme sur la Terre, **(page 114)** leur chaleur radioactive emmagasinée, produite depuis des millions d'années, a pu faire fondre l'intérieur et produire les inondations de lave qui, maintenant, recouvrent les « mers ».

Les détecteurs révélèrent que la répartition de la radioactivité à la surface de la Lune n'est pas uniforme. Ce qu'ils trouvèrent furent des concentrations ou « points chauds » d'éléments radioactifs. Une grande concentration apparut autour des berges de la Mer des Pluies. Il semblait que les roches entourant Mare Imbrium étaient légèrement plus radioactives que les roches situées ailleurs. Si les roches radioactives ont été soufflées en dehors de Mare Imbrium par l'impact il y a 4 milliards d'années, alors il était probable que l'intérieur de la Lune dans cette région ait contenu plus d'éléments radioactifs qu'ailleurs.

Les scientifiques se demandèrent si il y avait un rapport entre cette plus grande radioactivité et les coulées de lave qui avaient rempli la Mer des Pluies et qui s'étaient plus répandues sur la face visible de la Lune. Si la chaleur d'origine radioactive sous la Mer des Pluies avait fourni l'énergie nécessaire à la formation des laves, alors, pourquoi, se demandaient-ils, les laves s'étaient-elles formées 300 millions d'années après le Bassin Imbrium lui-même ? Pendant que ces questions faisaient l'objet de discussions, d'autres « points chauds » furent détectés sur la face cachée de la Lune, mais ceux-ci furent trouvés dans des zones ne contenant pratiquement pas de laves. Ces autres concentrations de radioactivité sont encore plus difficiles à expliquer. Peut-être n'avaient-elles jamais été assez chaudes pour produire des laves et sont-elles en train de refroidir lentement actuellement. Ou peut-être sont-elles en train de se réchauffer lentement pour devenir les lieux de futures éruptions volcaniques.

Les instruments en orbite recherchaient en réalité plusieurs sortes de radioactivité. Une des séries de détecteurs avait trouvé des « points chauds » d'uranium, de thorium et de potassium qui étaient autant de traces d'événements lunaires s'étant produits des milliards d'années auparavant. Un autre instrument recherchait des concentrations du gaz radon radioactif, qui pouvaient être en rapport avec des événements vieux de quelques semaines seulement.

La recherche de radon était réellement un essai de détection d'activité volcanique récente sur la Lune. Le radon est le produit de la désintégration radioactive de l'uranium contenu **(page 115)** à l'intérieur de la Lune. Comme c'est un gaz, le radon migre rapidement vers la surface à travers les failles et les crevasses des roches. Comme il se désintègre rapidement en d'autres éléments, toute trace de radon détectée à la surface de la Lune doit être arrivée de l'intérieur de la Lune en moins d'une ou deux semaines. La détection de radon devrait repérer exactement les endroits d'où les gaz sortaient rapidement de l'intérieur de la Lune, de tels endroits pouvant être des zones d'activité volcanique récente.

Les instruments apportèrent la preuve que le radon existait à la surface de la Lune. De plus, la répartition du radon, comme les autres éléments radioactifs, n'était pas uniforme. Des concentrations de gaz furent détectées près du cratère Aristarque et autour des berges de la plupart des « mers » circulaires. Mais cette découverte ne prouvait pas qu'une quelconque activité volcanique majeure se produisait. Les instruments en orbite étaient si sensibles qu'ils pouvaient détecter une quantité de radon radioactif équivalente à quelques milliers d'atomes seulement par centimètre carré de surface lunaire. Une si petite quantité pouvait être produite par une fuite lente en dehors de la Lune sans que cela ne s'accompagne d'éruptions de plus grandes quantités d'autres gaz.

Donc, la découverte qu'au moins une certaine quantité de matériau gazeux sort de la Lune est significatif. Alors que le Programme Apollo se terminait, la Lune semblait froide et calme, mais peut-être pas complètement morte.

[Sont intercalées entre les pages 115 et 117, 36 illustrations avec légendes, numérotées de 1 à 36]



1/ *l'homme rencontre la pierre de Lune.* Un scientifique du laboratoire de réception de la NASA, à Houston (Texas), inspecte une grande pierre revenue de la Lune. La roche est scellée dans un compartiment hermétique pour la protéger de l'oxygène et de la vapeur d'eau de notre atmosphère. (Nasa photographie 71-11-472).

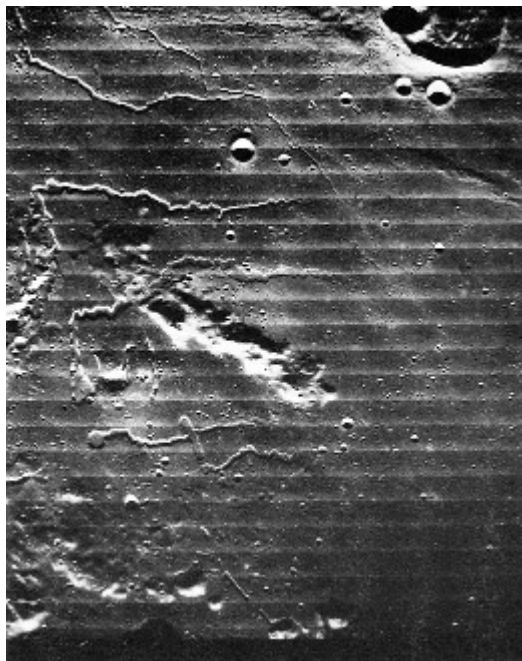


2/ *Une cicatrice d'impact géant sur la Lune ?* Vu à travers un grand télescope à partir de la terre, le cratère Copernic et son système spectaculaire de raies brillantes contraste avec la surface de la Lune. Ce cratère a 90 kilomètres de large, et les raies brillantes qui l'entourent furent probablement

produites par du matériau expulsé dans toutes les directions au moment de la formation du cratère (photographie de l'Observatoire du Mont Wilson, reproduite avec la permission des Observatoires du Hale).

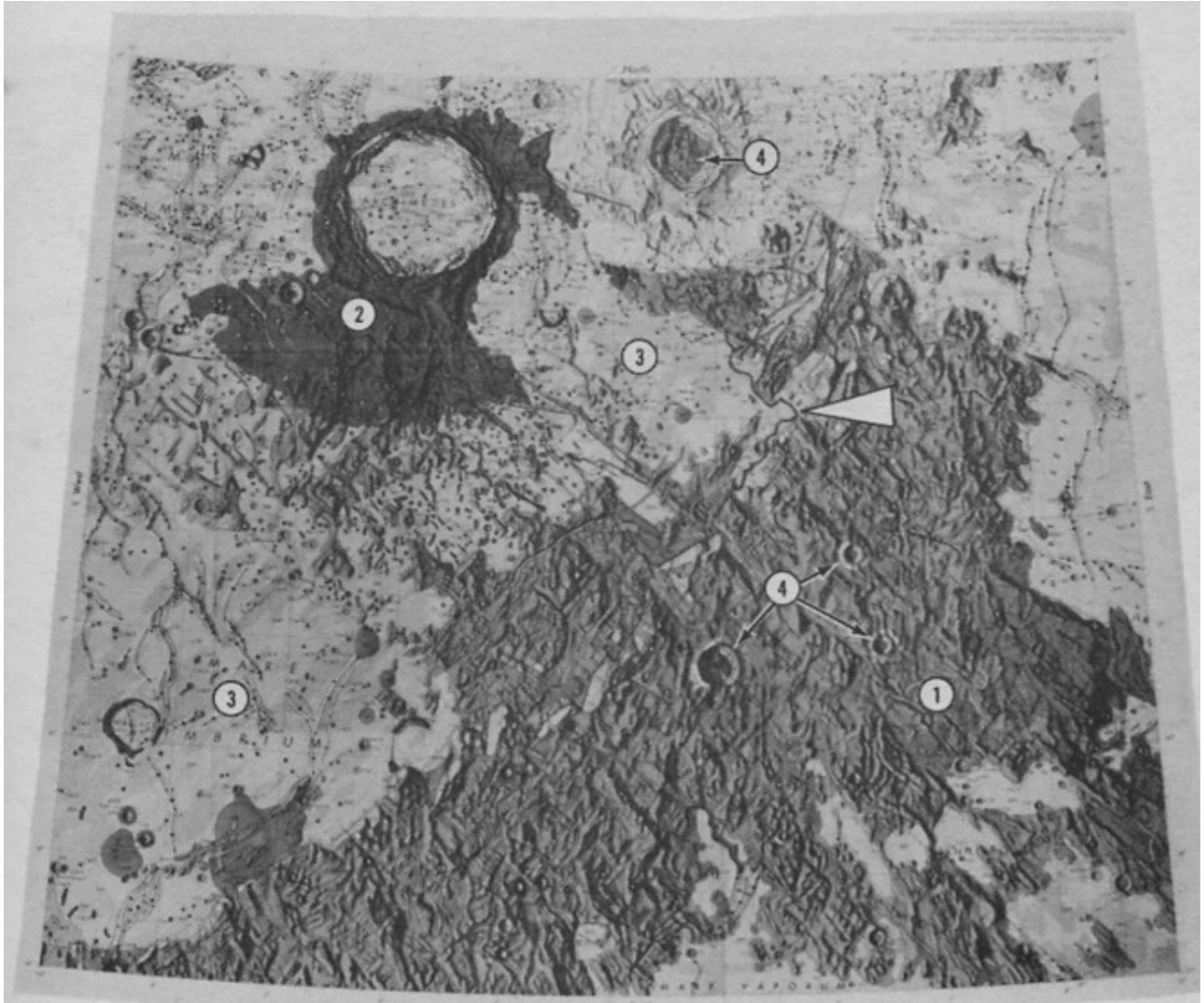


3/ *Un volcan lunaire géant ?* Le grand cratère Platon (en haut à gauche), vu au télescope depuis la Terre, a 90 kilomètres de large, de même taille que Copernic. Platon, cependant, est rempli du même matériau sombre (basalte) qui couvre la surface de Mare Imbrium (en bas à gauche), et le cratère peut être un volcan géant formé lorsque la lave fit irruption sur la Lune. (photographie du Lick Observatory, reproduit avec sa permission).



4/ *Rivières ou canaux de lave sur la Lune ?* Un groupe de canyons sinueux (sillons sinueux),

photographiés par Lunar Orbiter 5, traversent la surface de l'Océan des Tempêtes, près du cratère Prinz. En longueur, la photographie couvre environ 110 kilomètres de Lune. (Nasa, photographie de Lunar Orbiter, V-191-M)



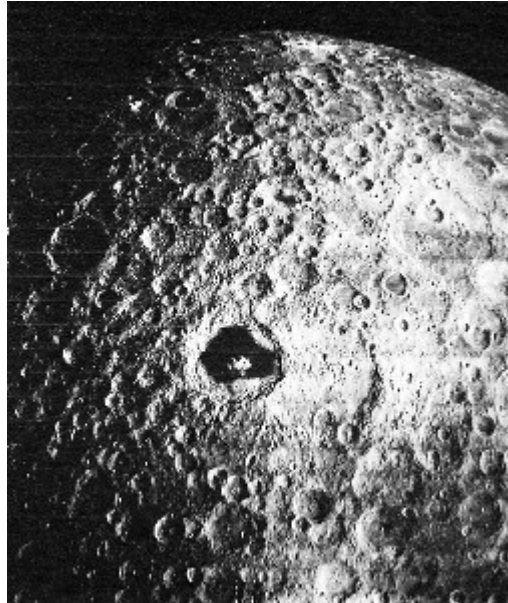
5/ *Une carte de roches lunaires (page suivante).* Une carte géologique, préparée à partir d'observations faites par un télescope terrestre, montre les différentes formations rocheuses dans la région de la Lune proche du site d'alunissage d'Apollo 15. Les roches les plus anciennes (unité 1, gris clair) étaient présentes avant la formation du Bassin de Mare Imbrium et forment maintenant les Monts Apennins. Les roches plus jeunes (unité 2, gris foncé) sont des couches de matériau projeté en dehors de grands cratères comme Archimède (en haut à gauche), dont la formation a suivi celle de Mare Imbrium mais a précédé son remplissage par des coulées de lave. Les plus jeunes roches suivantes (unité 3, gris blanc) sont les coulées de lave répandues sur Mare Imbrium (à gauche) et couvrant une partie de la couche de matériau expulsé d'Archimède. Les roches les plus jeunes (unité 4) sont de petites étendues de matériau expulsé de plus jeunes cratères d'impact de météorites.

Le site d'alunissage d'Apollo 15 est indiqué par une flèche en triangle. Le sillon Hadley est la ligne fine sombre proche, et lui et les autres sillons dans la région ont à peu près le même âge que les laves qui remplissent les « mers », environ 3,3 milliards d'années.

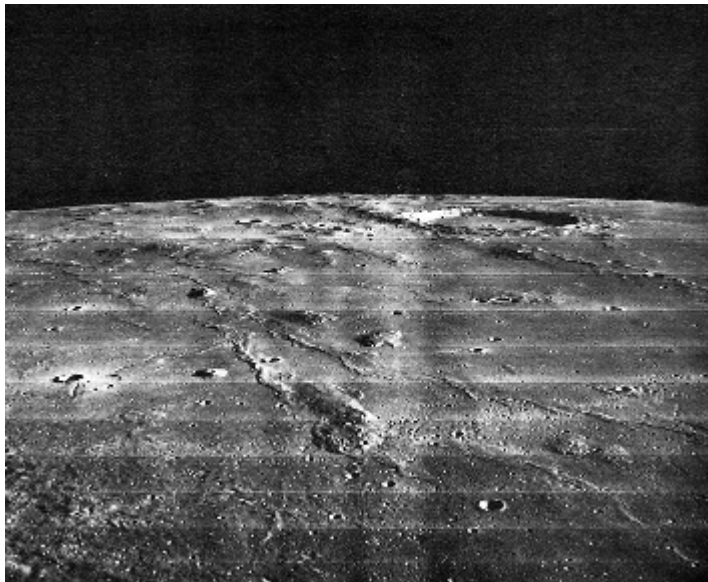
La carte recouvre une zone de plus de 400 kilomètres de côté. Le cratère Archimède (en haut à gauche) a 69 kilomètres de large. (La carte est extraite de la publication « Carte géologique de la région des Monts Apennins de la Lune », de R. J. Hackmann, Service géologique des USA, Carte I-463, (L A C-41), 1966.)



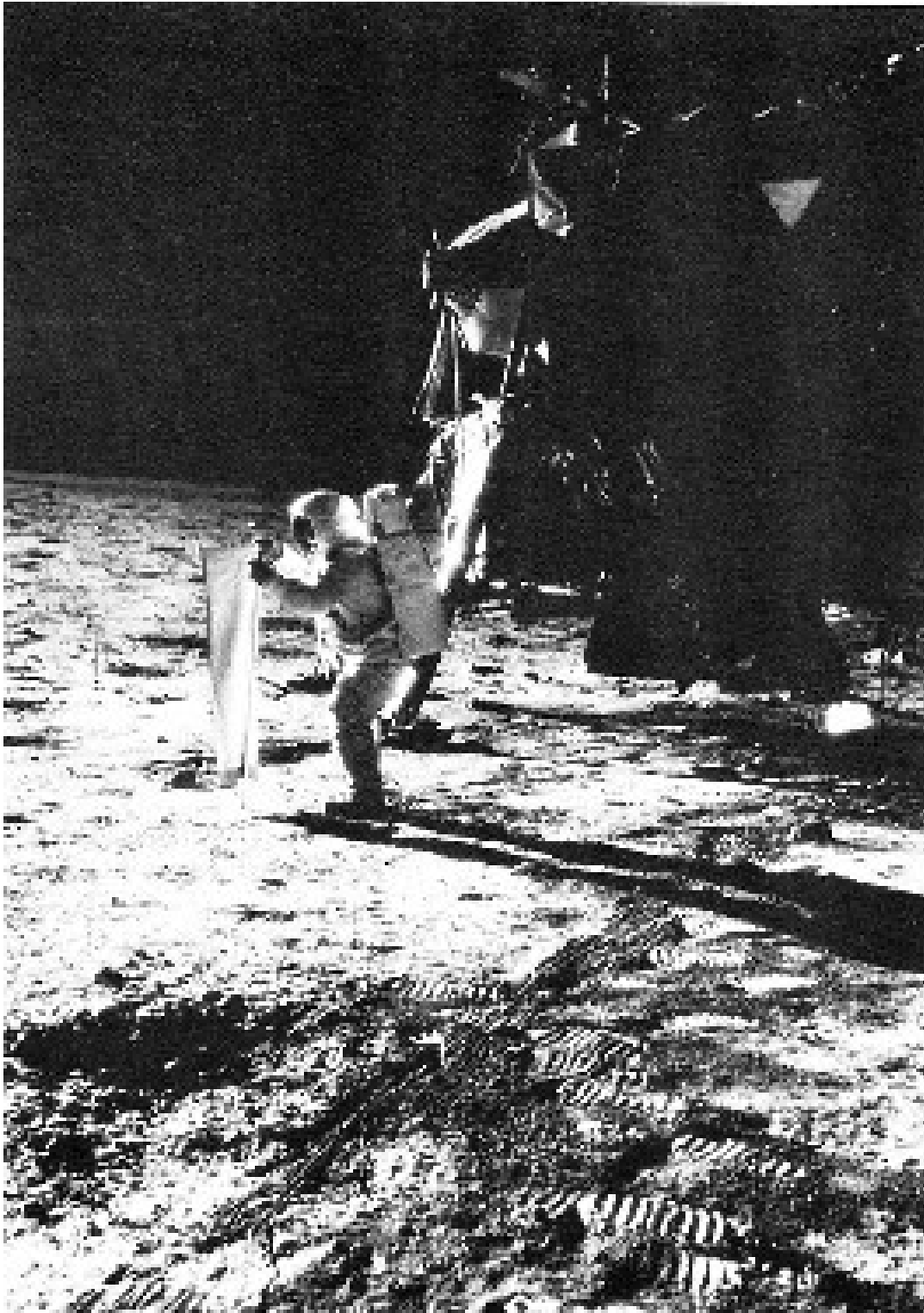
6/ *Un gros plan d'Orbiter à l'intérieur d'un énorme cratère lunaire.* L'intérieur du cratère Copernic, de 90 kilomètres de large, est vu avec des détails impressionnants sur une photographie d'Orbiter 2 prise juste au dessus du bord du cratère. Le rempart opposé du cratère apparaît avec une série de terrasses, en haut de l'image. Ce mur a plus de 3 kilomètres de hauteur, soit deux fois la profondeur du Grand Canyon. (NASA Photographie du Lunar Orbiter II- 162-).



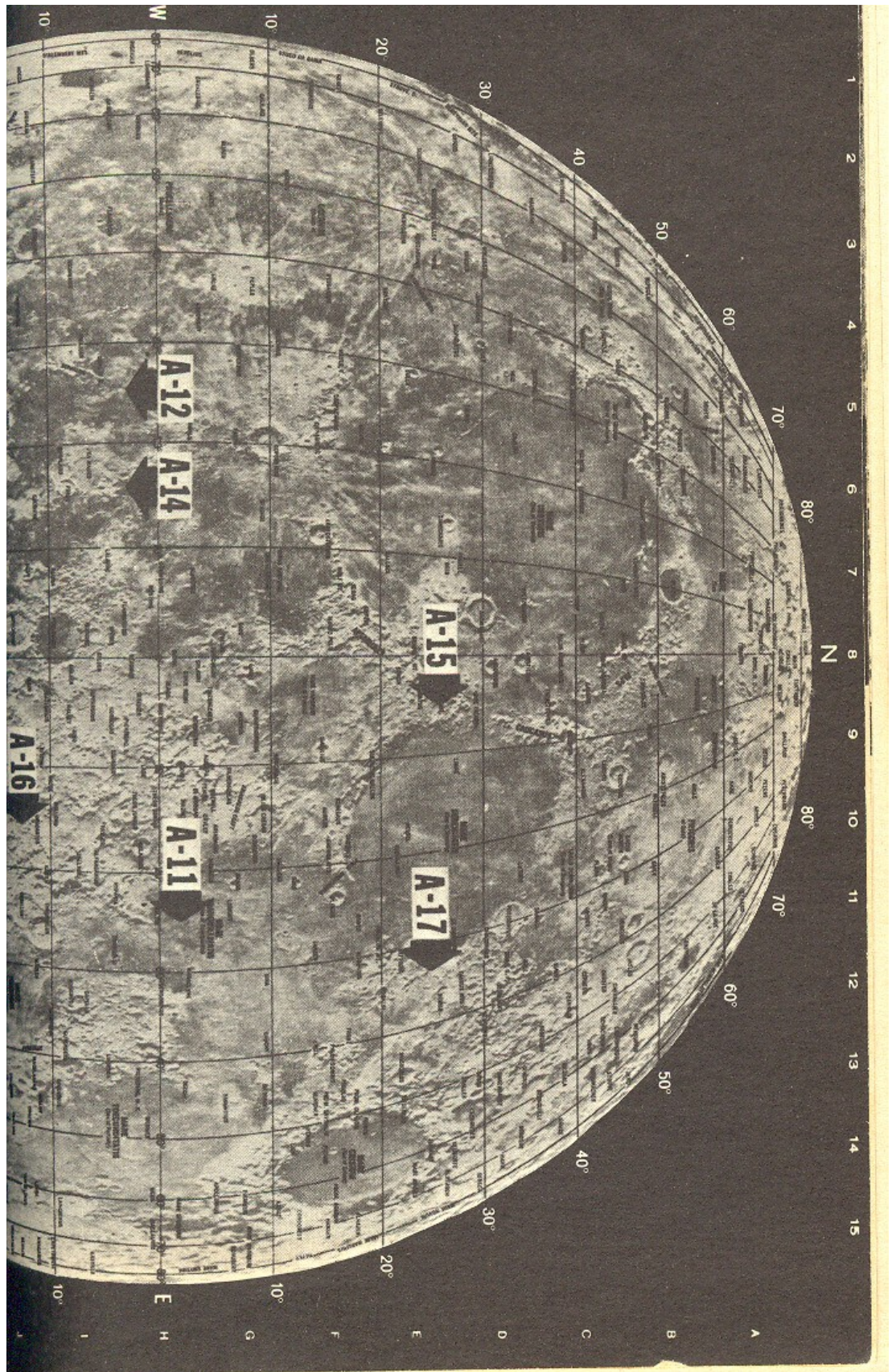
7/ *Un rare « œil noir » sur la face cachée de la Lune.* Le cratère Tsiolkovsky, du nom d'un pionnier russe des fusées, contient un des rares dépôts de matériau de « mer » sombre, probablement basaltique, sur la face cachée de la Lune. (NASA, photographie de Lunar Orbiter III-121-M).



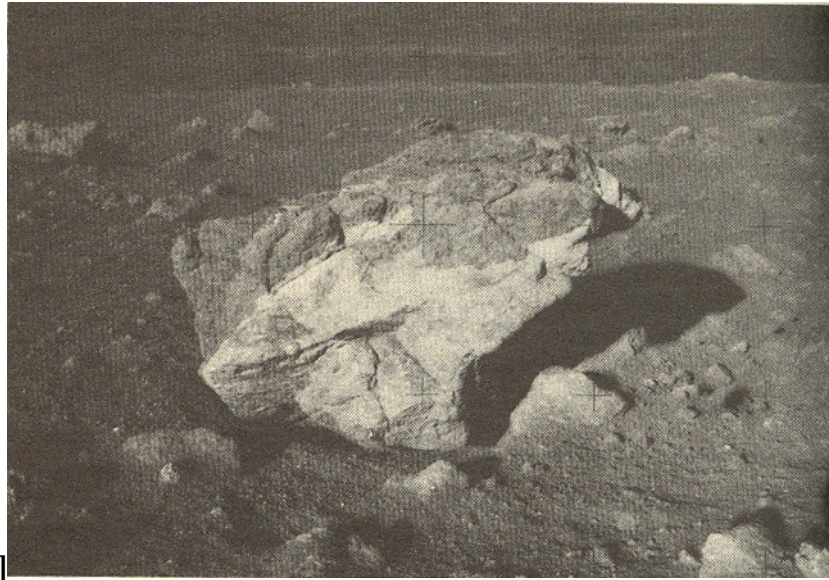
8/ *Un champ de volcans sur la Lune ?* Un panorama pris par « Lunar Orbiter » montre un grand nombre de dômes et de collines peu élevés à la surface de l'Océan des Tempêtes, près du grand cratère Marius, de 40 kilomètres de large, que l'on voit au loin, en haut à droite. Ces dômes, que l'on appelle les « collines Marius », sont plus jeunes que les laves qui recouvrent la surface de l'Océan des Tempêtes, et elles ont pu se former lors de petites éruptions de laves épaisses qui ne se sont pas répandues loin sur la surface. Des aspects semblables sont trouvés sur de nombreux champs volcaniques terrestres. (NASA, Photographie de Lunar Orbiter » II-213-M).



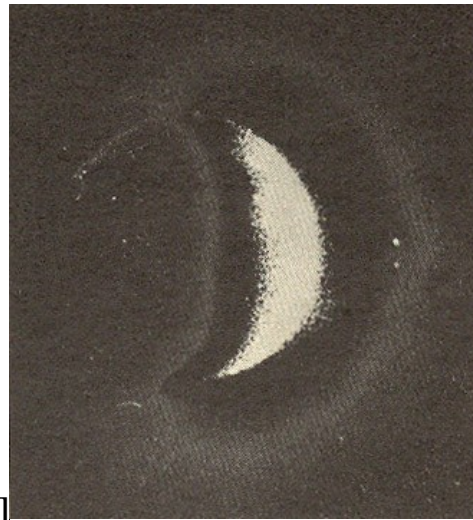
9/ *Récolte de fragments de soleil*. L'astronaute Edwin Aldrin, debout sur la surface lunaire, déroule le « store » d'expérience, une feuille d'aluminium. La feuille d'aluminium, qui piège les particules atomiques du vent solaire, est ensuite ramenée sur Terre afin d'être analysée. Le Module Lunaire, en partie dans l'ombre, est à l'arrière plan. (NASA, Photographie AS- 11-5872).



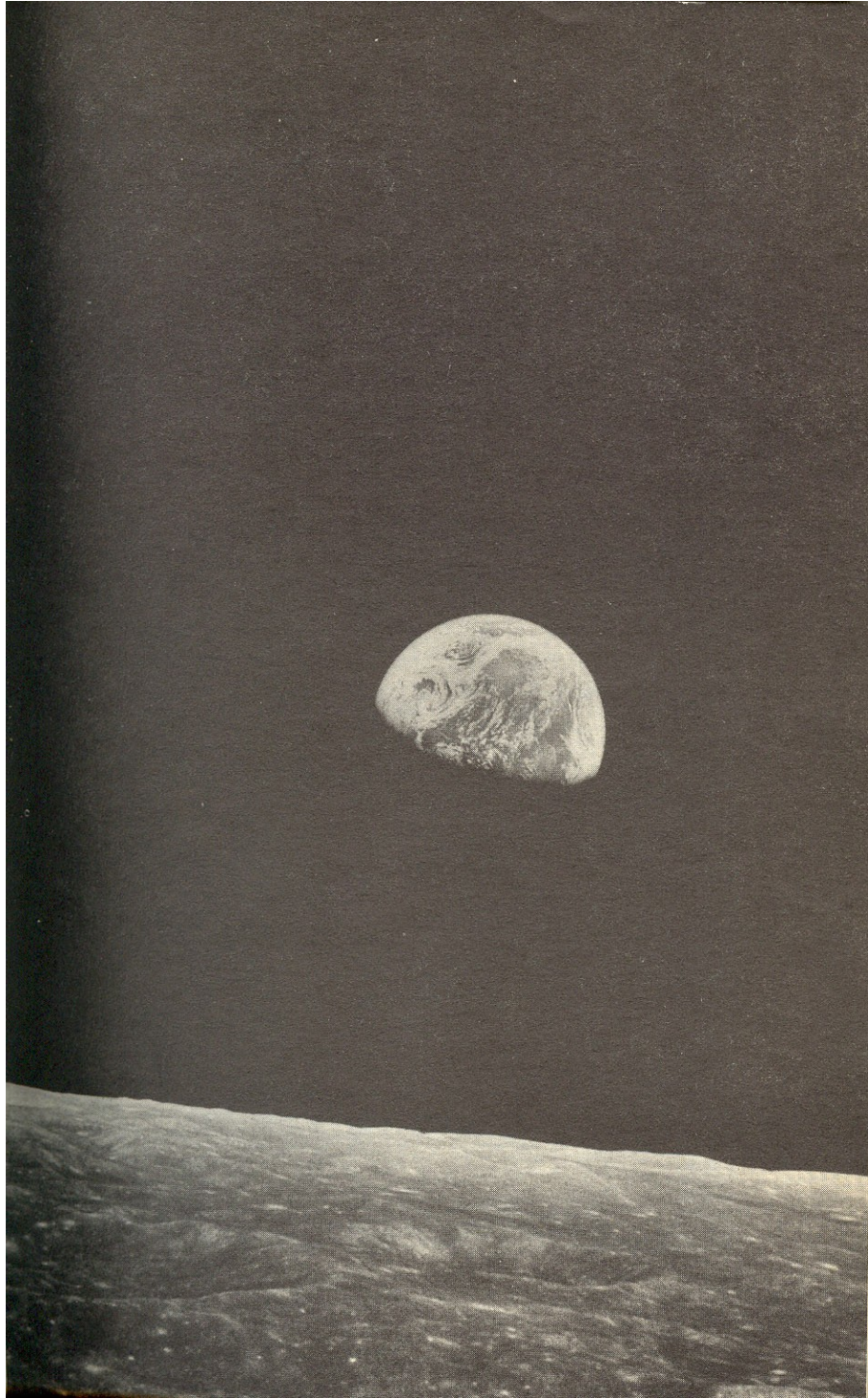
10/ *Les pas sur la Lune*. Les emplacements des six sites d'alunissage Apollo 11, 12, 14, 15, 16, 17. Apollo 13 revint sur terre sans alunissage réussi. (NASA photographie 72-H-183).

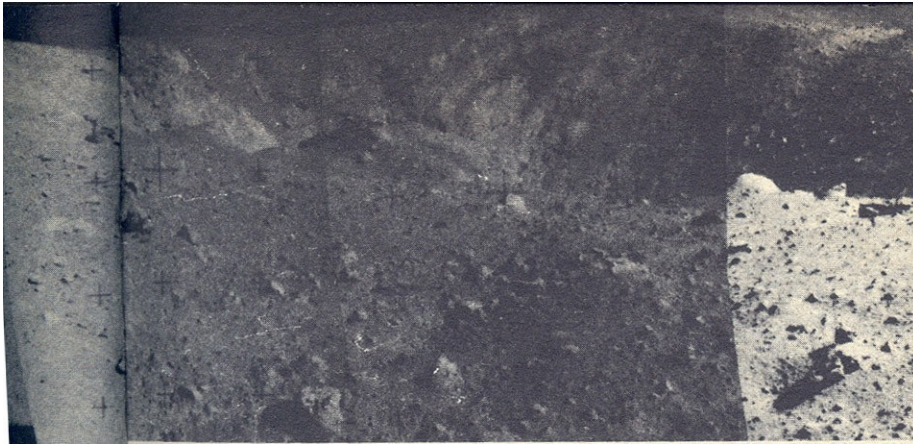


11/ *Une roche lunaire étrange et déroutante.* Ressemblant à un gâteau marbré bien malaxé, un bloc de brèche de dix pieds (de 3 à 4 mètres) de la formation Fra Mauro attend à la surface de la Lune d'être échantillonnée par les astronautes d'Apollo 14. Le matériau sombre qui compose la partie supérieure du bloc est mélangé avec le matériau blanc qui compose la majeure partie de la partie inférieure. Les deux parties claire et sombre sont des micro- brèches complexes qui sont la marque d'une histoire très compliquée de la roche entière. (NASA, photographie AS-14-68-9448).

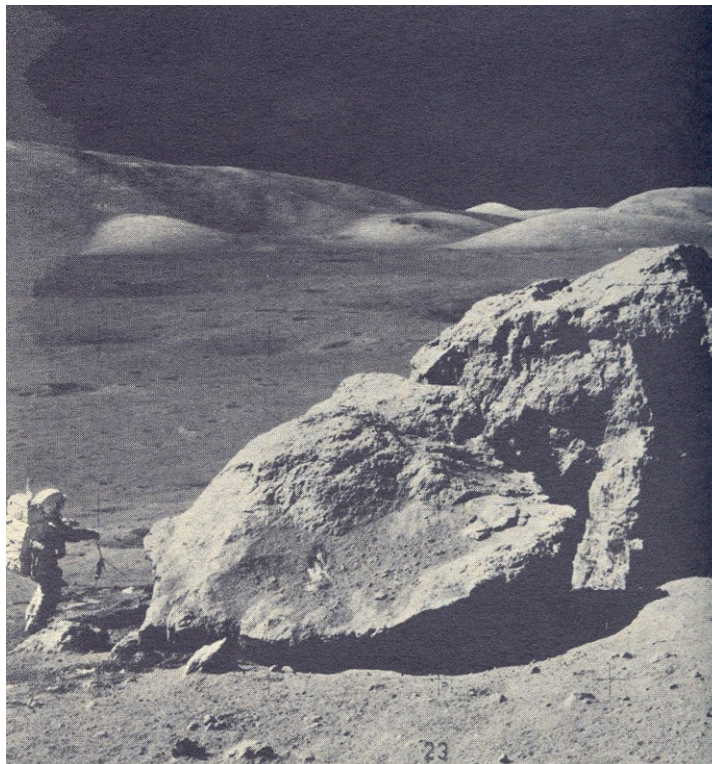


12 et 13/ *La terre dans une nouvelle lumière.* Une camera spéciale emportée par la mission Apollo 16 prend une photo de la terre en lumière ultraviolette qui ne pénètre jamais l'atmosphère terrestre. Sur une photographie agrandie (photo de gauche) la terre, 12 900 kilomètres de diamètre, occupe la partie centrale brillante de l'image. La camera a détecté, pour la première fois, la lumière d'un nuage d'hydrogène qui entoure la terre à une distance d'environ 80 500 kilomètres. Par comparaison, la vue habituelle de la Terre comme nos yeux la voient est montrée sur la photographie suivante prise par les astronautes d'Apollo 8 depuis l'orbite lunaire (NASA, photographies 68-H-140) en lumière visible et 72-H-761 en ultraviolet.

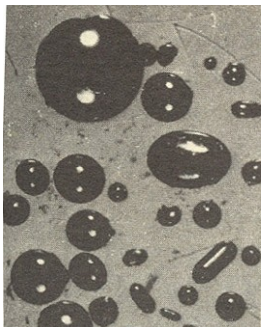




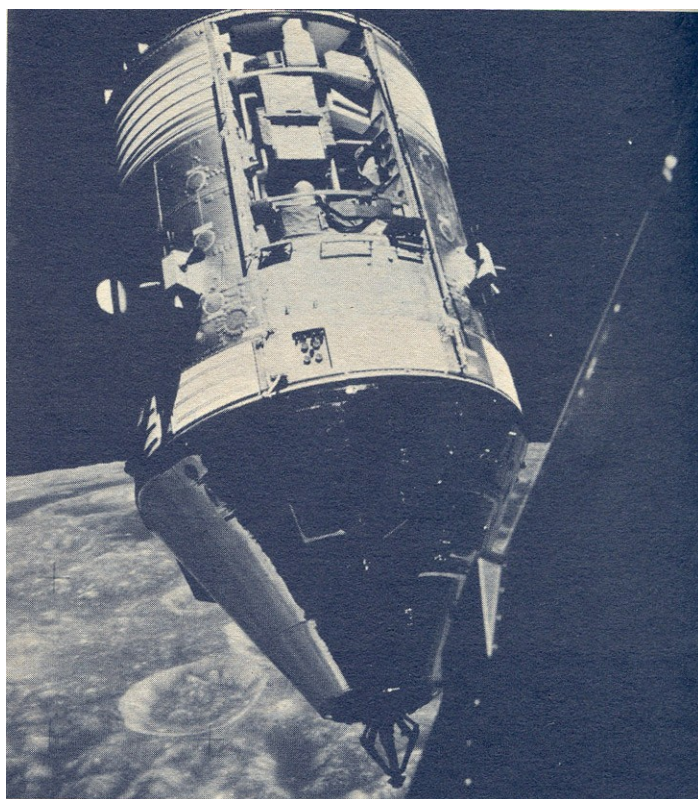
14/ *Un grand cratère météoritique permet d'échantillonner du matériau lunaire profond.* Le cratère North Ray fut un site essentiel pour la récolte d'échantillons lunaires lors de la mission Apollo 16. Le cratère montré ici par des photographies en mosaïque, a environ un kilomètre de large et expulsa probablement des blocs de pierre provenant d'une profondeur de plusieurs centaines de mètres au moment de sa formation. La récolte, autour du bord du cratère North Ray, permit aux astronautes d'Apollo 16 de recueillir des échantillons provenant d'une plus grande profondeur. (NASA, photographie 72-H-774).



15/ *Un problème d'échantillonnage dans la Vallée Littrow.* L'astronaute géologue d'Apollo 17 Harrison Schmitt récolte de petits échantillons à partir d'un énorme bloc de pierre fendu sur le versant Nord de la Vallée Littrow. Schmitt tient un « gnomon », un instrument à trépied qui donne une échelle et un diagramme de couleur pour les photographies de la surface. Derrière Schmitt se trouve le fond plat de la Vallée Littrow et les pentes raides du Massif Sud à environ 8 kilomètres de là. (NASA, photographie AS 17- 140- 21496).



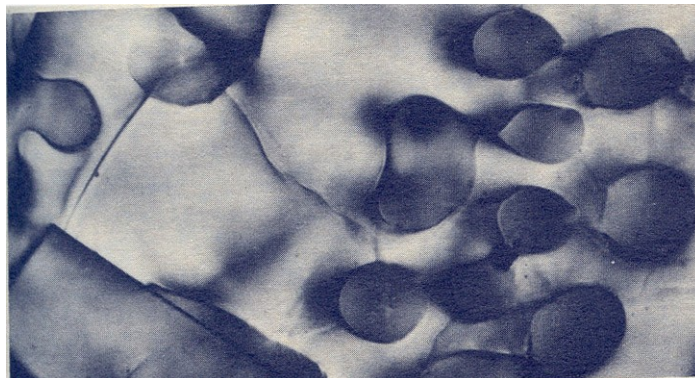
16/ *Sol Orange : jeune ou vieux ?* De minuscules gouttelettes de verre brun orange, les plus grandes d'environ $\frac{1}{2}$ millimètre de large, constituent le sol orange récolté par les astronautes d'Apollo 17 dans le cratère « Shorty » de la Vallée Littrow. (photographie grâce à la courtoisie de E. Roedder).



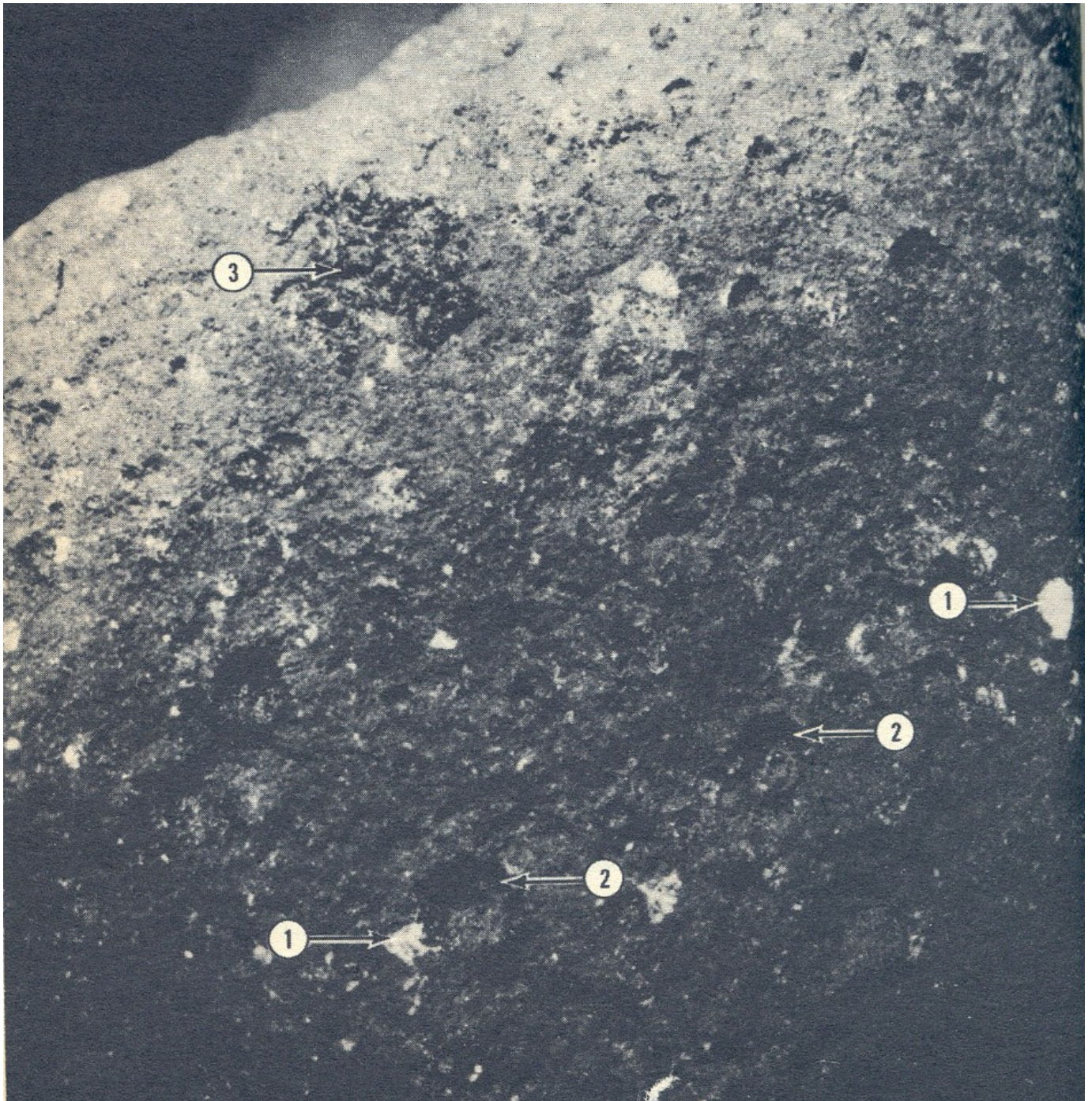
17/ *Mesure de la Lune à 100 kilomètres au dessus d'elle.* Cette vue du Module de commande Challenger d'Apollo 17, prise depuis le Module Lunaire juste avant l'arrimage des deux vaisseaux, montre les instruments scientifiques utilisés pour photographier la Lune et pour faire des analyses chimiques de la surface lunaire à partir de l'orbite lunaire. Les instruments apparaissent comme des objets en forme de boîtes dans l'espace ouvert à l'arrière du Module de Commande (en haut de l'image). (NASA, photographie AS 17-145-22254).



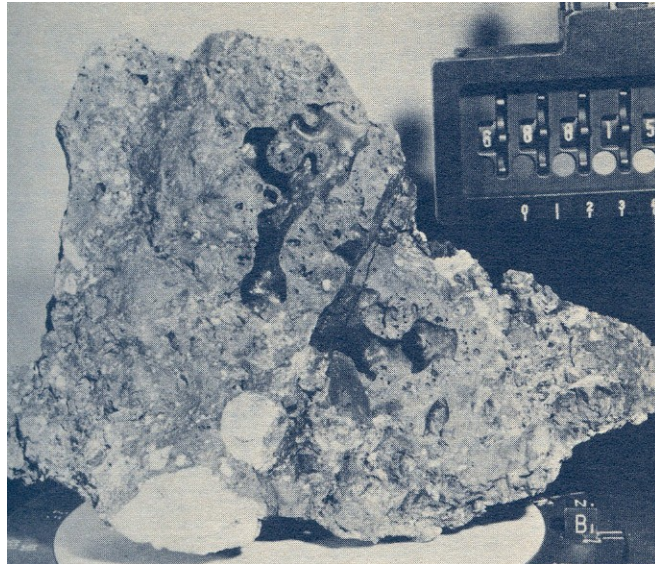
18/ *Jeux de construction d'un basalte lunaire..* Une lame mince de basalte lunaire rapporté par Apollo 11 montre les cristaux entremêlés des différents minéraux qui constituent la roche. La roche (échantillon 10047) est composée presque entièrement de trois minéraux : du pyroxène (cristaux gris avec de nombreuses craquelures) ; du feldspath (clair, cristaux en forme de lames) ; et ilmèneite (cristaux noirs opaques). (NASA photographie 5-69-47907).



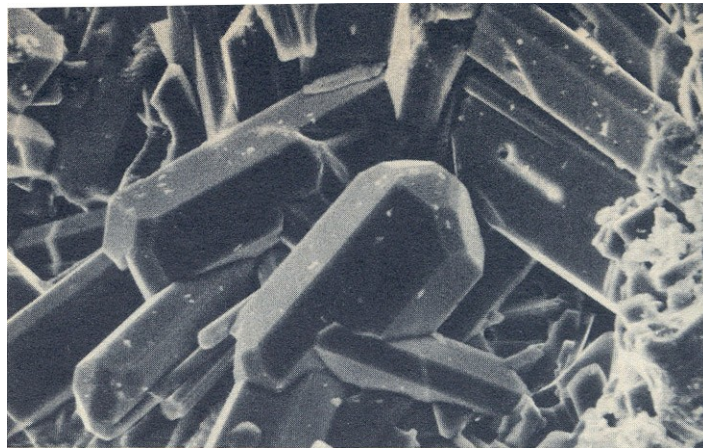
19/ *Le dernier reste de liquide dans un basalte lunaire* (ci-dessus) Une photographie spectaculaire montre les gouttelettes de verre formées à partir du dernier reste liquide restant lorsque près de 99% de la roche était solide. Les minuscules gouttelettes de verre (gris), de moins d'un dixième de millimètre de large, sont fortement enrichies en silice (SiO_2) par comparaison avec le basalte d'origine. Les gouttelettes furent piégées dans du « pyroxferroïte » (un nouveau minéral trouvé uniquement dans des roches lunaires) qui forme le fond blanc. Apollo 11, échantillon 10003. (imprimé avec la permission de E. L. Roedder et collaborateurs, dans Exposés de la Conférence du programme scientifique Apollo 11, vol. 1, p. 815, c 1970 par Pergamon Press, Ltd).



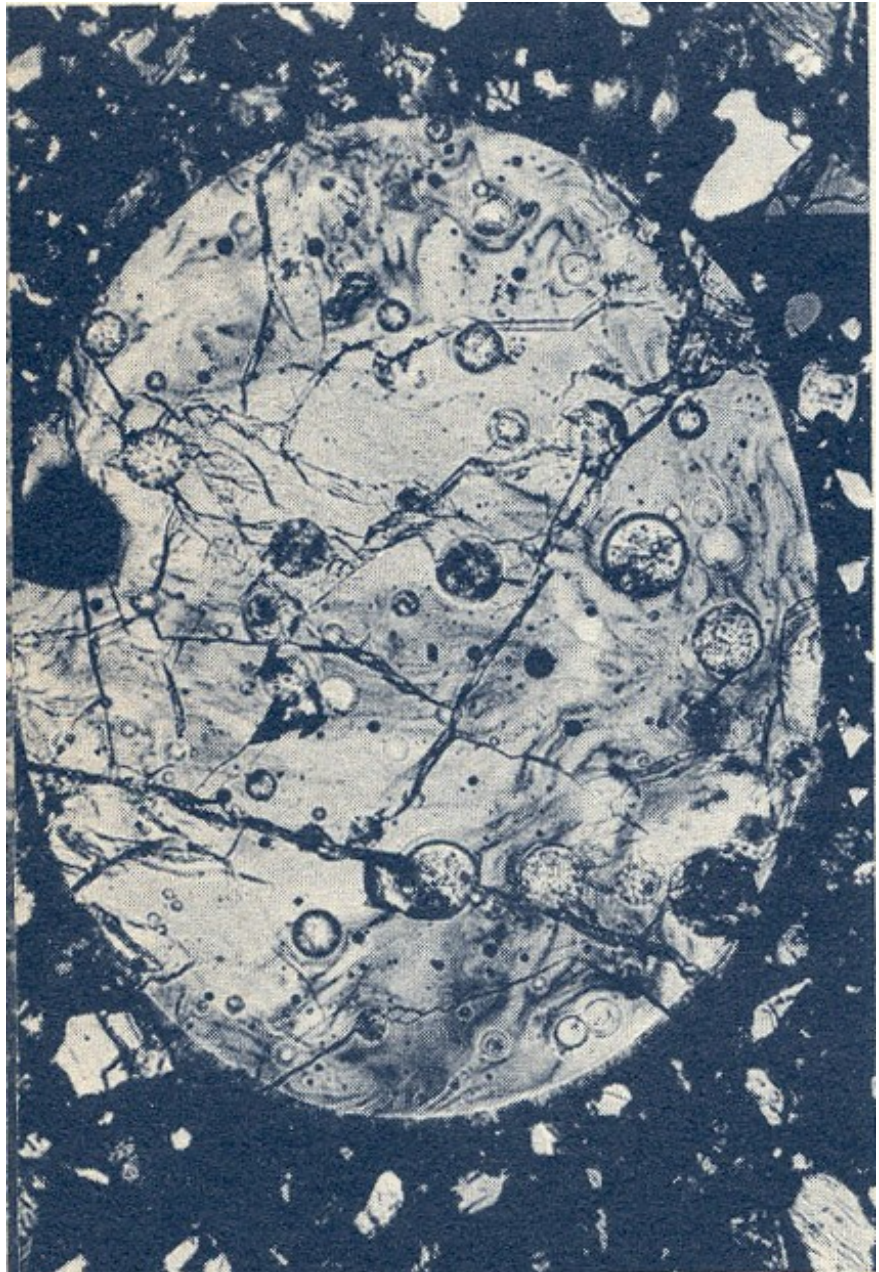
20/ Une micro brèche lunaire : petits morceaux d'autres roches : un spécimen de micro brèche, d'environ 25 millimètres de long, contient de minuscules fragments de roches blanches, riches en feldspath (1) probablement issues de continents lunaires. La partie inférieure du spécimen montre plusieurs dépressions (2), produites par l'impact de très petites météorites alors que la roche était sur la surface lunaire. Certaines de ces dépressions contiennent de petites gouttes de verre formées par la chaleur de l'impact. Une plus grande inclusion de verre (3) tapisse la partie supérieure gauche du spécimen. Échantillon 10019, récolté par la mission Apollo 11. (NASA, photographie 70-H-233).



21/ *Une grande brèche dans la roche fondue.* Récolté à partir des parties continentales de Descartes, ce spécimen de 15 centimètres contient de nombreux fragments de feldspath blanc dans une matrice de matériau plus sombre antérieurement fondu. Le mélange de fragments de roche et de roche fondue fut probablement formé par un impact d'une grande météorite. Des gaz libérés du liquide fondu forment les grandes cavités d'aspect contourné au centre de la roche. Échantillon 68815, récolté par la mission Apollo 16. (NASA, photographie 7-H-677).



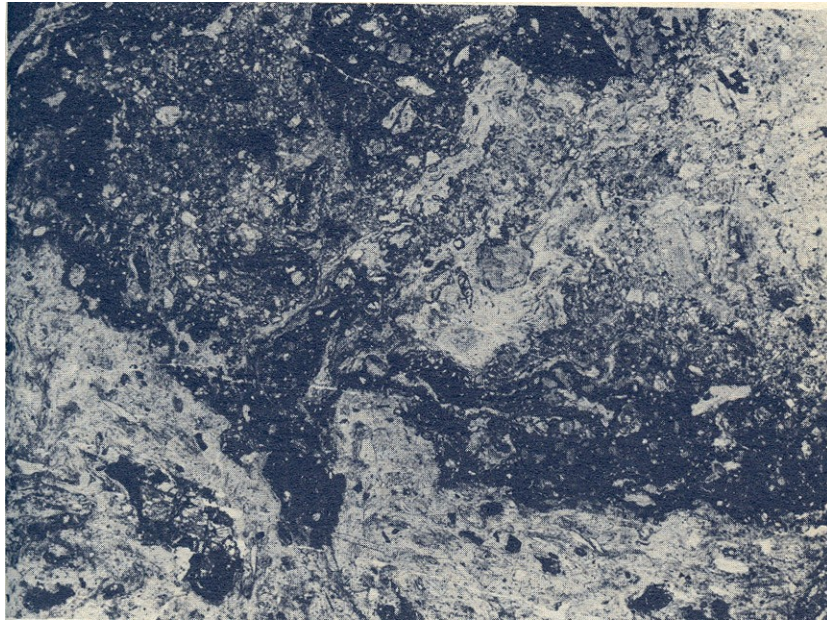
22/ *Cristaux formés à partir d'une vapeur lunaire.* Délicatement nichés dans une petite cavité d'une brèche collectée par la mission Apollo 14, de petits cristaux d'apatite (phosphate de calcium) formés directement à partir de la vapeur qui remplissait les cavités quand les roches se formèrent il y a presque quatre milliards d'années. Les formes parfaites des faces des cristaux sont montrées sur cette photographie au microscope électronique ; le plus long des cristaux ne mesure que 0,05 millimètre de long. (NASA, photographie 72-H-35).



23/ *Une goutte de verre due à un impact de météorite.* Une très petite perle de verre, d'environ un demi millimètre de long, fut formée par la fusion brusque d'une roche percutée par une petite météorite. La goutte fondue fut éjectée du cratère comme un élément de jet de vaporisation de gouttelettes pour devenir une partie du régolite récolté par la mission Apollo 11. (échantillon 10065). La perle montre des coulées linéaires produites par le mélange incomplet de verres de compositions chimiques différentes produit par la fusion des différents minéraux dans la roche d'origine. Les minuscules points noirs dans le verre sont de petites sphérules de nickel-fer, probables fragments de la météorite responsable de la fusion. La gouttelette est entourée de régolite noir qui contient de plus petits fragments de verre et des éclats de cristaux de minéraux. (avec la permission de E. C. T. Chao et collab., travaux de la conférence scientifique lunaire d'Apollo 11, vol. 1, p. 302, c, 1970 Pergamon Press Ltd.).



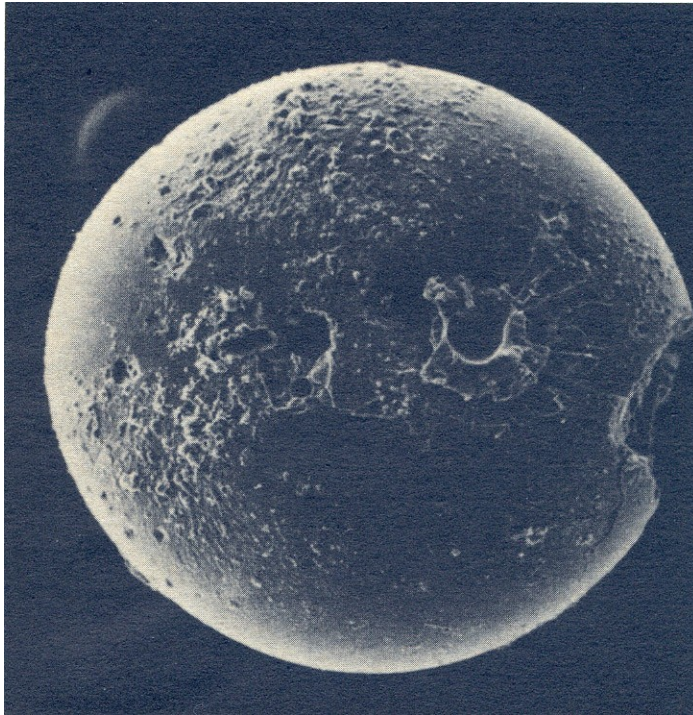
24/ *Un cratère lunaire sur la terre.* Meteor Crater, en Arizona, situé à environ 100 kilomètres à l'est de Flagstaff, Arizona, est un des cratères d'impact de météorite les mieux préservés sur Terre. D'environ 1 220 mètres de large, il fut formé par l'impact d'une météorite d'environ 30 mètres de diamètre, il y a 25 000 à 30 000 ans. Meteor Crater fut l'un des nombreux sites géologiques d'entraînement sélectionné pour les astronautes d'Apollo. (Photographie de John S. Shelton, « *Geology Illustrated* » (San Francisco : W. H. Freeman Co, 1966) avec sa permission).



25/ *Une copie terrestre de roche lunaire.* Une microbrèche riche en verre récoltée à partir d'un ancien grand cratère d'impact au Canada a beaucoup de traits communs avec des brèches d'impact lunaires. Elle contient de nombreux fragments de roches et de minéraux écrasés et brisés et présente un mélange très poussé de différentes sortes de verre clair et sombre. La photographie a environ 2 millimètres dans le sens de la longueur. Le spécimen provient de West Clearwater Lake, au Canada, un cratère d'impact de 32 kilomètres de diamètre environ et âgé d'environ 300 millions d'années. (Photographie, avec la permission de M. R. Dence).



26/ *Les aspects de « l'horloge à microcratères ».* Ce côté d'un échantillon de roche d'Apollo 16 (60015) montre un ensemble impressionnant de microcratères dont les diamètres varient d'environ un demi millimètre jusqu'à la limite de la visibilité. Chaque microcratère contient un point central bordé de verre sombre (dans lequel apparaissent quelques éclats de lumière) et est entouré d'un halo blanc de roche fracturée. En mesurant l'âge du verre entourant l'intérieur de chaque microcratère, les scientifiques espèrent mettre au point une « horloge à micro cratères » pour évaluer la durée d'exposition des roches comme celle-ci à la surface de la Lune. (Imprimé avec la permission de H. Fechtig et collab., dans « Exposés de la cinquième conférence scientifique », vol. 3, p. 2464, c 1974, Pergamon Press Ltd.)

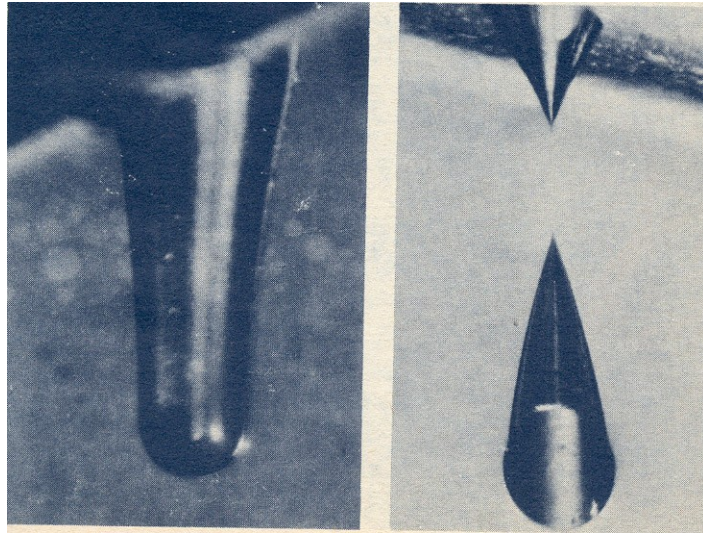


27/ *Microcratères sur une perle de verre lunaire.* Une petite sphérule de verre provenant du régolite, de quelques dixièmes de millimètre seulement, a été percutée par d'encore plus petites particules qui ont formé de petits cratères d'impact à sa surface. Les micro-cratères typiques ont un petit trou entouré de verre, lui-même ceint d'un plus large anneau d'où du matériau a été détaché. Un autre micro-cratère est visible de profil comme un trou sur le bord de la sphérule. (Photographie avec la permission de D. S. Mc Kay et U. S. Clanton).

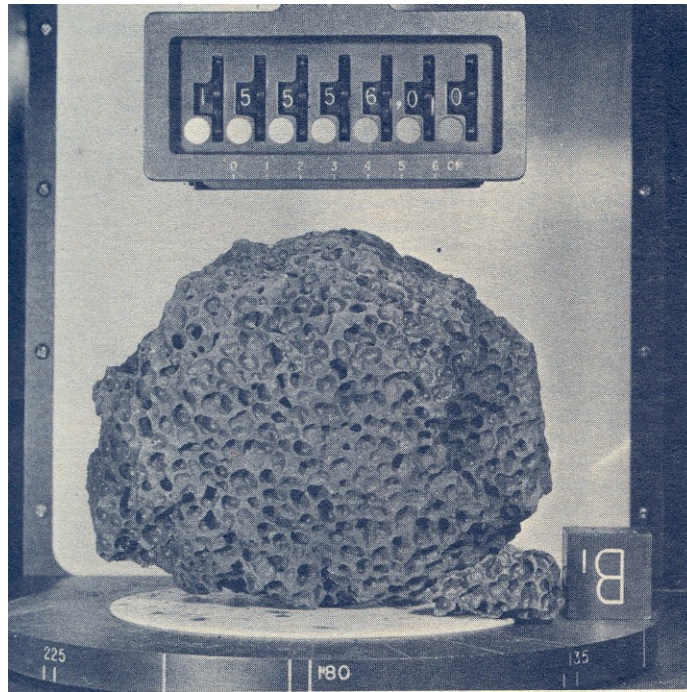


28/ « *Composant magique* » dans le régolite. Ce petit fragment de verre jaune et brun, d'aspect informe, de moins d'un millimètre de large, est typique du matériau appelé KREEP, une sorte de roche lunaire qui contient d'inhabituelles grandes quantités de Potassium (K), de terres rares (REE) et

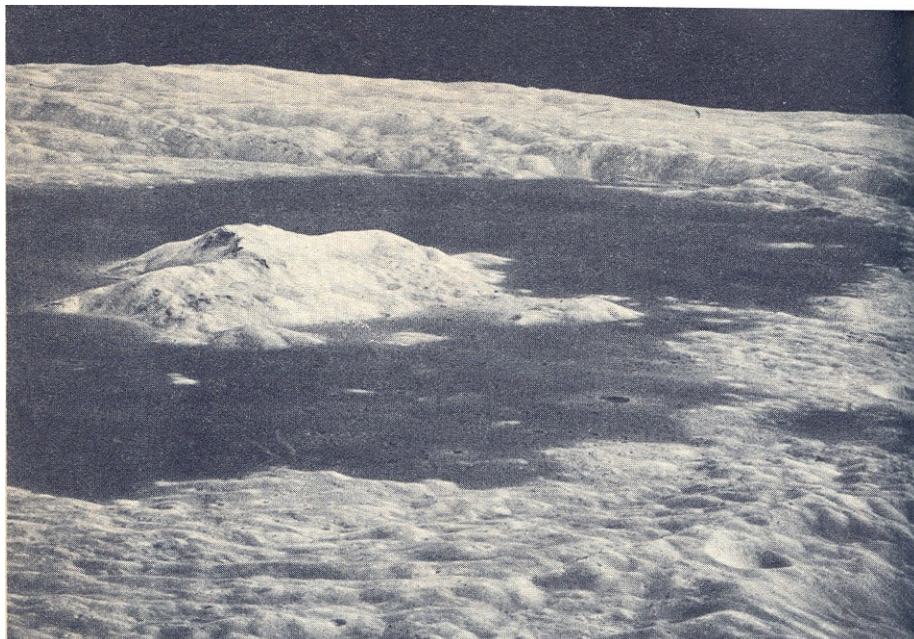
de Phosphore (P). Ce spécimen, rapporté avec des échantillons de régolite récoltés par Apollo 12, est montré ici sur une photographie en microscopie électronique. Des combinaisons chimiques dans le matériau à KREEP se réalisèrent apparemment il y a plus de 4,4 milliards d'années, révélant ainsi une trace partielle de la très ancienne histoire de la Lune. (imprimé avec la permission de D. S. Mc Kay et collab., Exposés de la seconde conférence scientifique lunaire, vol. 1, p. 755, ©, Pergamon Press, Ltd, 1971).



29/ *Traces de rayon cosmique sur le vaisseau Apollo.* Des rayons cosmiques qui passèrent à travers le vaisseau d'Apollo 14 pendant son périple lunaire laissèrent ces traces indélébiles sur des pièces de plastique Lexan qui faisaient partie d'un instrument scientifique transporté par la mission. Les techniques de gravure utilisées pour révéler les traces les transformèrent en tubes et cônes creux dans le plastique. La trace en haut à gauche, d'environ deux millimètres de long, comporte deux cônes et fut probablement formée par un atome d'argon. (Imprimé avec la permission de R. L. Fleisher et collab., Science, vol. 181, p. 436, © American Association for the advancement of Science ; 1973).

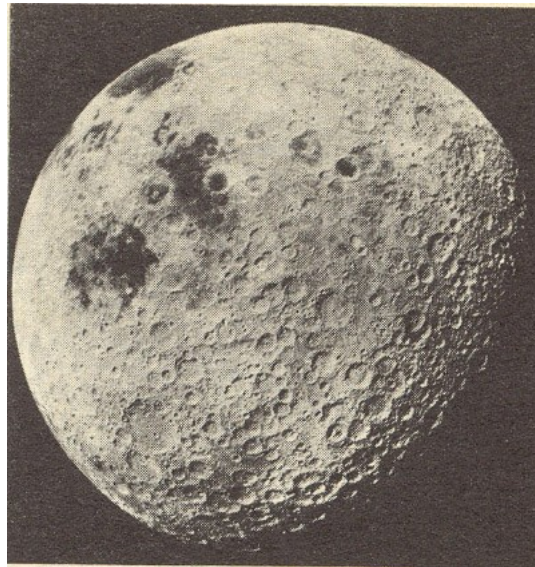


30/ *Bulles dans une lave lunaire.* Ce spécimen de lave d'aspect « mousseux », de 10 centimètres de long , conserve la trace de bulles s'étant produites il y a plus de trois milliards d'années par des gaz piégés dans la lave fondue. Les gaz, qui s'échappèrent au moment de la solidification de la lave, laissèrent derrière eux une roche composée principalement de bulles, chacune d'elle ayant une paroi lisse et luisante. Échantillon 15556, récolté par les astronautes d'Apollo 15. (NASA, photographie S-71- 43328).



31/ *Un lac lunaire Noir, gelé pour l'Éternité.* Vu depuis le Module de Commande d'Apollo 15, le cratère Tsiolkovsky, de 250 kilomètres de diamètre, sur la face cachée de la Lune, expose son pic central élevé et blanc et son fond plat composé du matériau sombre des « mers ». Tsiolkovsky est une des quelques zones de matériau sombre de « mers » dispersées sur la face cachée de la Lune, alors que

près de la moitié de la face visible est couverte de matériau de « mer ». (NASA photographie AS 15-91-13383).

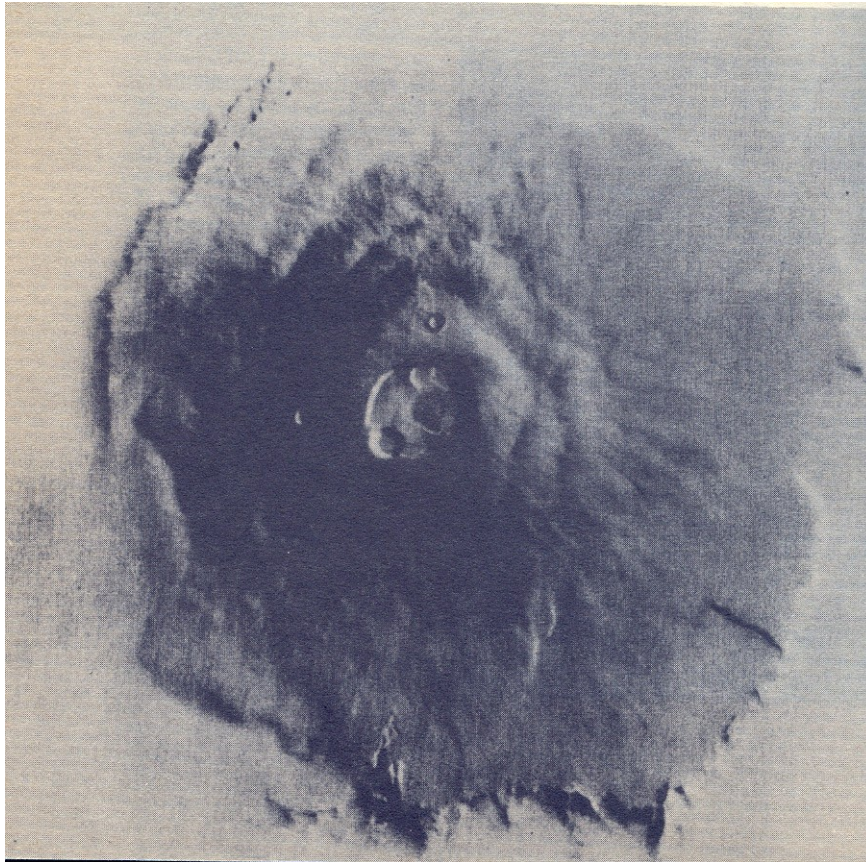


32/ *Un regard d'adieu à une Lune flambant neuf.* L'essentiel de la face cachée de la Lune, jadis inconnue, est clairement montré sur cette prise de vue prise par les astronautes d'Apollo 16 dès le début de leur retour sur Terre. (NASA, Photographie 72-H-848).



33/ *Mercure au dernier quartier.* Mercure, la planète la plus proche du Soleil, se présente aux appareils photographiques de la sonde automatique Mariner 10, avec un aspect fortement cratérisé semblable à celui de la Lune. Ce panorama de Mercure est composé à partir de 18 images prises le 29 mars 1974, lorsque Mariner 10 était à environ 200 000 kilomètres de la planète. La majeure partie éclairée de Mercure est dans l'hémisphère Sud de la planète. Le diamètre de Mercure est d'environ 5 000 kilomètres et les plus grands cratères photographiés ont environ 200 kilomètres de diamètre.

(NASA, photographie 74-H-39).



34/ *Un gigantesque « Olympus Mons » sur Mars.* Olympus Mons, qui peut être la montagne volcanique la plus grande du système solaire, fut photographié par Mariner 9 en janvier 1972, alors qu'une tempête de sable martienne se calmait. Le pic géant, se révélant graduellement dans l'atmosphère éclaircie, a 500 kilomètres de diamètre et s'élève à environ 25 kilomètres, (3 fois la hauteur de l'Everest) au dessus de la plaine environnante. (NASA, photographie 73-H-104).



35/ « . . . se voir comme les autres nous voient ». Le souhait poétique de Robert Burn est réalisé lors du retour de l'équipage d'Apollo 17 sur cette photographie spectaculaire de la Terre. Madagascar et la côte Est de l'Afrique occupe le centre de l'image. (NASA, photographie 72-H-1578).



36/ « Nous œuvrons pour la Paix de toute l'Humanité ». Avec les dernières expéditions du Programme Apollo, presque terminé, l'astronaute d'Apollo 17, Eugene Cernan se tient debout sur la surface de la Lune entre la Rover Lunaire et le drapeau américain. (NASA, photographie 73-H-199).

CHAPITRE SIX

ANATOMIE D'UNE PIERRE DE LUNE

Alors que la dernière mission Apollo revenait saine et sauve sur Terre, l'intérêt scientifique du Programme se focalisait vers des douzaines de laboratoires où des scientifiques travaillaient d'arrache-pied pour déterminer de quoi étaient faites les roches lunaires, comment elles s'étaient formées et quel était leur âge. En fin de compte l'image de la Lune fournie par les astronautes et les instruments allait se combiner avec la trace du passé figé dans les roches pour fournir un panorama de ce que la Lune avait été dans le passé et comment elle était devenue ce qu'elle est aujourd'hui.

Quand les premiers échantillons lunaires furent revenus sur Terre, aussi bien les roches que les astronautes eux-mêmes furent mis en quarantaine pendant trois semaines. Les roches furent soigneusement examinées en vue de la recherche de vie microscopique, et animaux et plantes témoins furent exposés aux roches et subirent des injections de poussière lunaire. Des médecins examinèrent les astronautes pour voir s'ils n'avaient pas contracté des maladies extraterrestres venant de microbes lunaires. Les astronautes, au soulagement de tous, restèrent en bonne santé. Les souris, cailles, poissons, huîtres, insectes et plantes qui furent exposés au matériau lunaire ne montrèrent aucune maladie. **(page 118)** Aucun micro-organisme ne se développa dans les culturesensemencées à partir de roches lunaires. Des analyses de roches lunaires ne décelèrent aucun composé organique mais seulement quelques minimes quantités de carbone inorganique. Tout comme la surface visible de la Lune, les roches lunaires étaient dépourvues de vie. La période de quarantaine se termina sans incident, et les échantillons lunaires furent distribués aux scientifiques impatients. En fin de compte, la stérilité des roches lunaires devint si évidente que la quarantaine fut abandonnée complètement après la mission Apollo 14.

Les échantillons d'Apollo devinrent le centre d'un programme de recherche scientifique qui avait été soigneusement planifié plusieurs années avant le premier alunissage. Environ 1 000 scientifiques aux États-Unis et dans de nombreux pays étrangers participèrent à l'analyse des échantillons lunaires. Leur recherche s'inspirait de près d'un siècle d'expérience scientifique. Les méthodes et instruments qui s'étaient montrés si efficaces pour expliquer la nature et l'origine des roches terrestres furent maintenant utilisés pour l'étude des échantillons lunaires.

Les échantillons d'Apollo furent analysés avec les équipements disponibles les plus nouveaux et les plus perfectionnés. Une batterie d'instruments compliqués mesurèrent presque chaque propriété physique et chimique qui pouvait être déterminée : composition chimique, densité, radioactivité, conductivité thermique, conductivité électrique, magnétisme et beaucoup d'autres. Malgré toute cette technologie moderne, un des instruments favoris pour l'étude géologique des échantillons lunaires

avait à peine changé depuis sa première utilisation sur les roches terrestres il y a plus d'un siècle : le microscope pétrographique.

Un microscope pétrographique est semblable à un microscope conventionnel sauf qu'il utilise la lumière polarisée pour déterminer la texture microscopique des roches et pour identifier les minéraux qu'elles contiennent³⁰. Il y a même une branche séparée de la géologie appelée pétrographie qui traite de l'étude de ces roches avec de tels microscopes. **(page 119)** Ces instruments ont été pendant longtemps la base de l'équipement pour l'étude des roches terrestres et ils furent utilisés pour les nouvelles roches lunaires sans aucune modification.

Pour étudier une roche au microscope, un petit copeau de l'échantillon est d'abord collé sur une lame de verre, puis le copeau est immobilisé et poli jusqu'à l'obtention d'une épaisseur de celle d'une feuille de papier (0,03 millimètre ou environ le 1/3 de l'épaisseur d'un cheveu humain). L'échantillon est alors si fin que la lumière peut le traverser. En regardant cet échantillon (appelé « lame mince ») au microscope, un observateur peut identifier une fine trame de minuscules cristaux qui ne peuvent pas être vus à l'œil nu. Sous le microscope, les cristaux de la roche se comportent comme de petits prismes polarisants et ils produisent une belle palette de couleurs utilisée pour identifier les différents minéraux de la roche.

Le grand avantage de ce microscope, même à l'ère des instruments compliqués et permettant une analyse fine, est qu'il permet un examen direct du mode d'organisation de la roche. Des paramètres tels que les tailles et formes des cristaux et les rapports d'un cristal avec un autre en apprennent beaucoup sur l'origine et l'histoire de la roche. D'un rapide coup d'œil au microscope, un scientifique peut déterminer comment la roche s'est formée, si elle fut un jour liquide, si elle cristallisa rapidement ou lentement, si l'un des minéraux s'est formé avant l'autre ou si la roche fut brisée ou refondue après sa formation.

L'analyse chimique **(page 120)** fut une partie tout aussi importante de l'étude des roches lunaires. Des méthodes d'analyse chimique ont été mises au point et utilisées sur des roches terrestres depuis des années. L'analyse commence par la dissolution d'un échantillon dans l'acide, suivie de tests chimiques sur la solution pour déterminer la quantité de chaque élément présent. Le problème résultant de l'utilisation de cette technique sur les roches lunaires est qu'elle nécessite beaucoup trop de matériau, environ 5 grammes pour chaque analyse, soit la quantité équivalente à environ une

30. La lumière polarisée se forme en faisant passer un rayon de lumière ordinaire à travers un cristal transparent. Le rayon d'origine est composé de nombreuses ondes, chacune d'elle se propageant dans un seul plan. En lumière ordinaire (non polarisée), ces plans sont orientés dans toutes les directions, mais lorsque le rayon traverse le cristal, la structure atomique de celui-ci absorbe toutes les ondes qui ne sont pas orientées selon une direction unique. La lumière qui sort du cristal ne contient que les ondes qui vibrent dans le même plan ; une telle lumière est dite polarisée.

Puisque la lumière polarisée est produite par la structure interne des cristaux, c'est un outil efficace pour la recherche et l'identification des minéraux transparents. Dans un microscope pétrographique de laboratoire, la lumière polarisée est produite par le passage de la lumière à travers un cristal de calcite spécialement préparé (spath d'Islande). Le même effet peut être produit avec le Polaroid commercial, un matériau composé de très fins cristaux tous agencés dans la même direction.

douzaine de comprimés d'aspirine. Cette quantité est insignifiante lorsqu'il s'agit d'échantillons terrestres que l'on peut récolter par kilogrammes entiers voire par tonnes. Mais le matériau lunaire est rare et il y avait beaucoup de scientifiques attendant de recevoir des échantillons.

Heureusement, un nouvel instrument pour analyses chimiques fut mis au point juste quelques années avant l'alunissage d'Apollo 11 : la microsonde électronique. Cette machine que l'on commençait juste à utiliser pour l'analyse des roches terrestres, avait plusieurs avantages par rapport aux anciennes méthodes qui la rendaient idéale pour l'analyse des échantillons lunaires. Tout d'abord, l'instrument n'était pas destructeur, si bien que les analyses pouvaient être faites sans gaspiller du matériau rare. Ensuite, les analyses pouvaient être faites sur les mêmes coupes minces préparées pour l'étude microscopique ; ainsi une grande quantité d'informations pouvait être obtenue à partir d'une aussi petite quantité qu'un dixième de gramme de régolite ou d'un morceau de roche de la taille d'une tête d'épingle.

La microsonde électronique est un instrument compliqué qui remplit une petite salle, mais il fonctionne d'après des principes simples. (Figure E). Il contient une source d'électrons semblable au « canon à électrons » d'un tube de télévision ; ce système bombarde l'échantillon avec un jet d'électrons à haute énergie. Les électrons excitent les atomes dans l'échantillon et provoquent l'émission de Rayons X. Le reste de la microsonde électronique consiste en composants qui détectent et enregistrent les Rayons X. Chaque élément de l'échantillon émet des rayons X qui lui sont propres, et à partir des intensités des différents Rayons X, la quantité de chaque élément présent peut-être calculée. Habituellement, la microsonde électronique est reliée à un petit ordinateur qui calcule immédiatement la composition chimique. **(page 122)** Une analyse chimique complète de 10 à 12 éléments peut être faite en deux minutes. En utilisant les anciennes méthodes, la même analyse aurait demandé plusieurs jours.

#####

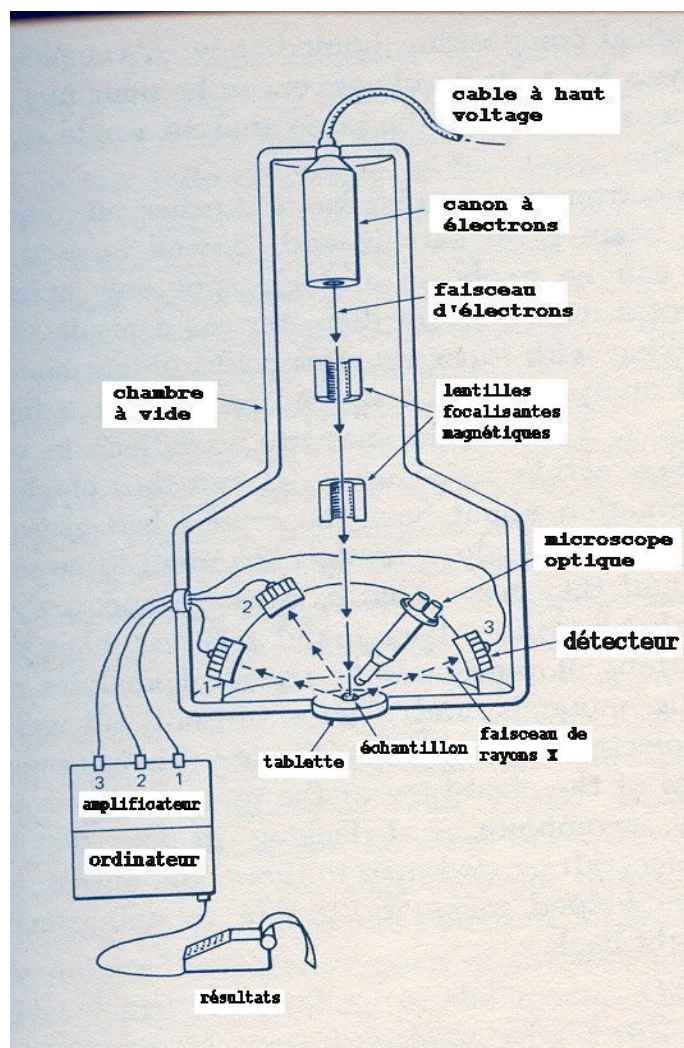


Figure E (page 121). Analyse chimique : le moyen facile. La microsonde électronique, montrée ici sous la forme d'un diagramme simplifié, est essentielle pour obtenir des analyses précises et non destructrices de petits échantillons lunaires. Un faisceau d'électrons (ligne continue) est produit au sommet de l'instrument et ensuite focalisé par des lentilles magnétiques vers l'échantillon lunaire en bas de l'instrument. Le bombardement d'électrons provoque l'émission de Rayons X par les atomes de l'échantillon, (pointillés) rayons qui sont récupérés par les détecteurs. D'après l'intensité des différents Rayons X, la composition chimique de l'échantillon peut être donnée par l'ordinateur.

La microsonde électronique a un avantage supplémentaire. Le faisceau d'électrons est si étroit et si bien focalisé qu'une analyse peut être faite sur un point unique de quelques millièmes de millimètre de diamètre. Il en résulte que les scientifiques travaillant sur des échantillons lunaires peuvent obtenir des centaines d'analyses chimiques à partir d'un unique cristal de quelques millimètres de long seulement. Ils pouvaient mesurer des variations de la composition chimique à l'intérieur d'un unique cristal et ainsi obtenir une information importante sur la manière dont le cristal a grandi. Ils pouvaient détecter et analyser des cristaux trop petits pour être vus, et ils pouvaient découvrir et analyser de nouveaux minéraux qui n'avaient jamais été trouvés dans des roches terrestres.

Sur les dizaines de milliers d'analyses chimiques de roches lunaires, régolite, minéraux et verres, pratiquement toutes furent faites au moyen de la microsonde électronique. Sans cet instrument, notre connaissance de la chimie de la Lune aurait été incertaine, incomplète et privée de détails précis. Le vaisseau spatial Apollo amena des hommes sur la Lune, mais la microsonde électronique permit la compréhension de ce qu'ils rapportèrent.

LES ROCHES

Quelques jours seulement après le déchargement des échantillons d'Apollo 11, les premières analyses préliminaires établirent que les roches lunaires étaient semblables aux roches terrestres dans leur composition chimique générale. Des scientifiques trouvèrent que la Terre et la Lune étaient faites à partir des mêmes ingrédients chimiques, bien que les proportions soient légèrement mais significativement différentes. Comme la Terre, la Lune s'est avérée être différente dans sa composition chimique du Soleil, qui contient 99 pour cent de la matière du système solaire. **(page 123)** Le Soleil contient 89 pour cent d'hydrogène alors que la Terre en a très peu (juste assez pour former l'eau des océans) ; apparemment la Lune n'en a pas du tout.

Bien que la composition chimique de base de la Terre et de la Lune soit semblable, il y a d'importantes différences entre roches lunaires et roches terrestres dans leur aspect et leur origine. Sur la Terre, les géologues ont reconnu depuis longtemps trois sortes de roches fondamentales. Les roches ignées comme le granit et le basalte, formées à partir du refroidissement et de la solidification des liquides silicatés fondus qui font irruption des volcans ou se solidifient sous forme d'énormes masses sous la surface de la Terre. Les roches sédimentaires, comme le grès, l'argile et le calcaire se forment dans les couches de matériau déposé dans les océans. Les roches métamorphiques : gneiss, schiste et marbre se forment quand les roches sédimentaires ou ignées sont comprimées dans les profondeurs de la Terre et métamorphosées en nouvelles roches sous l'effet de hautes températures et pressions.

A la différence des trois types de roches trouvées sur la Terre, tous les échantillons d'Apollo furent identifiés à des roches ignées qui se solidifièrent à partir de matériau n'ayant fondu qu'une seule fois. Aucune roche sédimentaire telle que l'argile ou le calcaire ne fut trouvée. Cependant, les échantillons Apollo n'étaient pas tous d'apparence semblable. Même à l'œil nu, il était possible de voir que des roches lunaires différentes avaient des minéraux et des textures différentes. Différentes sortes de roches ignées furent trouvées dans des parties différentes de la Lune, et des scientifiques réalisaient que la géologie de la Lune, tout en n'ayant pas certains aspects de la géologie terrestre, serait encore un problème complexe et représenterait un défi pour arriver à la débrouiller.

LAVES EN PROVENANCE DES « MERS »

Les premiers échantillons rapportés par Apollo 11 et par les missions suivantes provenant de « mers » lunaires s'avéraient bien être des roches élémentaires, et elles furent rapidement identifiées comme une sorte de lave appelée basalte. Le basalte est une roche commune sur Terre. Elle forme la lave qui fait irruption de façon spectaculaire des volcans d'Hawaii et d'Islande **(page 124)** et qui s'écoule plus calmement des failles profondes des fonds océaniques. Il y a environ 15 millions

d'années, de grands torrents de basalte ont élevé l'étendue large et plate du Columbia River Plateau au Nord-Ouest des États-Unis.

La similitude entre les roches lunaires et les laves basaltiques terrestres fut une découverte heureuse, quoique inattendue. Maintenant les géologues pouvaient tirer partie de leur expérience des basaltes terrestres pour expliquer l'origine des « mers » lunaires. Ils démontraient par analogie que les « mers » avaient été construites progressivement par des éruptions successives de lave fondue qui se déversait et se répandait sur des dizaines, voire des centaines de kilomètres à la surface de la Lune. Comme les laves sur Terre, la plupart des coulées de lave lunaire considérées individuellement n'avaient que quelques mètres d'épaisseur, mais une éruption était suivie rapidement d'une autre, et en fin de compte des centaines de coulées avaient construit un empilement de couches d'une épaisseur de plusieurs kilomètres qui remplirent les bassins de « mers » et se répandirent à travers les « mers » lunaires. Certaines de ces couches isolées furent aperçues par les astronautes d'Apollo 15 dans le sillon Hadley, où le sillon réalise une coupe à travers un entassement de coulées. Ailleurs, au niveau des « mers », les couches elles-mêmes furent cachées sous le dépôt superficiel des décombres lunaires.

Les géologues ont montré que les laves qui sortent aujourd'hui des volcans terrestres se sont formées à partir de la fusion d'une partie de l'intérieur de la Terre sous l'effet de la chaleur interne. La fusion a lieu à une profondeur de 50 à 200 kilomètres sous terre, et la lave fondue trouve son chemin vers la surface à travers failles et fissures profondes. La découverte de laves sur les « mers » lunaires prouvait que, environ 3 milliards $\frac{1}{2}$ d'années auparavant, la Lune avait eu à peu près le même comportement que la Terre aujourd'hui. Il était raisonnable de conclure que la Lune avait dû être chaude à l'intérieur, suffisamment pour avoir fondu, la lave fondue étant ainsi obligée de remonter de la profondeur et de faire irruption à sa surface.

L'identification des roches de « mers » comme étant des coulées de basalte fut basée principalement sur l'examen microscopique de leur structure et sur l'identification des minéraux rentrant dans leur composition. Sous le microscope, les échantillons lunaires montraient la même structure (**page 125**) de cristaux enchevêtrés, caractéristique des roches terrestres formées à partir d'un refroidissement après fusion (photo 18). L'étude ultérieure montra que les basaltes lunaires étaient composés presque entièrement des mêmes minéraux que ceux trouvés dans les basaltes terrestres³¹.

Le pyroxène, un silicate de Ca-Mg-Fe, est le minéral le plus commun des laves lunaires, et représente environ la moitié de la plupart des spécimens. Il forme des cristaux jaune brun dont la taille varie de plusieurs millimètres à quelques centimètres et souvent assez grands pour être visibles à l'œil

31. Les minéraux se présentent naturellement comme des composés chimiques ; les roches sont composées d'un ou plusieurs minéraux. Les minéraux les plus communs des roches ignées aussi bien terrestres que lunaires sont appelés silicates et sont composés principalement des éléments chimiques que sont le silicium (Si) et l'oxygène (O). Les autres éléments communément retrouvés dans les silicates sont le calcium (Ca), l'aluminium (Al), le fer (Fe), le magnésium (Mg), le sodium (Na), et le potassium (K). La plupart des roches ignées contiennent aussi des minéraux oxydés composés d'oxygène et de métaux comme le fer, le titane (Ti) et le chrome (Cr).

nu. L'olivine, un silicate de Mg-Fe, est moins communément associé au pyroxène ; il peut être absent de nombreuses laves lunaires. Quand on le trouve, il forme des cristaux d'un vert pâle de quelques millimètres. Le plagioclase (ou feldspath), un silicate de Ca-Al, forme des cristaux blancs allongés et est incolore et transparent dans les lames minces. L'ilménite, un oxyde de Fe-Ti est aussi commun. Il se présente sous forme de cristaux feuilletés noirs opaques même en lame mince. Le spinelle est un oxyde de Mg-Fe-Cr-Al qui se trouve en petites quantités dans les laves lunaires, habituellement sous forme de petits cristaux noirs.

Malgré les nombreuses ressemblances entre les basaltes terrestres et lunaires, il y a d'importantes différences entre eux, et un géologue peut facilement faire la distinction entre un morceau de basalte terrestre et de basalte lunaire. En un mot, les roches lunaires ne contiennent pas d'eau, alors que les basaltes terrestres en ont toujours un pour cent environ. Pour le profane cela peut sembler de peu d'importance, mais c'est un fait capital pour la compréhension des histoires différentes de la Terre et de la Lune. Pour le géologue regardant au microscope, cela signifie que les roches lunaires ont un aspect beaucoup plus frais que les roches terrestres, qui ont été plus ou moins altérées par (page 126) l'eau depuis leur formation. Les roches lunaires ne contiennent pas de minéraux hydratés, pas d'argiles et pas d'oxydes de fer c'est à dire de matériau rouillé. Les géologues furent stupéfaits de découvrir que le basalte lunaire vieux de 3 milliards et demi d'années paraissait réellement plus frais que la lave chaude récoltée à partir d'un volcan terrestre seulement quelques jours après une éruption.

Je crois que ce fut cette fraîcheur qui m'impressionna le plus lorsque je regardai pour la première fois au microscope un basalte lunaire. Un collègue excité qui venait juste de recevoir sa première lame mince de roche lunaire, se précipita dans mon bureau et colla la minuscule lame de verre sous mon nez et sur la platine du microscope sur lequel je travaillais.

La mosaïque de cristaux que le microscope révélait était familière. Des cristaux de pyroxène d'un jaune brun pâle étaient imbriqués avec de petites plaques transparentes de feldspath plagioclase et des plaques noires d'ilménite. Un petit appui sur le levier du polariseur et l'œil découvrit les couleurs et les aspects d'un vitrail coloré abstrait.

Les pyroxènes brillaient dans les rouges éclatants, les bleus, les jaunes, alors que les cristaux de plagioclase prenaient des teintes grises et blanches neutres et montraient un ensemble de raies parallèles qui révélaient les plus fins détails de leur structure cristalline.

Même sans la lumière polarisée, les couleurs de l'intérieur de simples cristaux de pyroxène étaient variables. Elles étaient jaune brun pâle au milieu des cristaux, et la couleur prenait une teinte cannelle plus profonde vers les bords. La microsonde électronique montra après que les bords plus sombres étaient riches en fer et en titane.

Les structures et les minéraux étaient familiers. Ce qui était étrange était l'absence d'altération, la netteté, la fraîcheur de chaque cristal. Même dans une lave terrestre fraîche, les grains de pyroxène seraient striés de minuscules veinules de minéraux verts tels que la serpentine ou chlorite qui ont été formées sous l'effet de l'eau sur le pyroxène. Les cristaux de plagioclase seraient piquetés d'inclusions de minéraux argileux, et l'ilménite aurait formé une enveloppe blanchâtre d'oxydes de fer et de titane. Aucune altération de ce type ne fut trouvée dans les roches lunaires. (page 127) Les

cristaux étaient dépourvus de toute tache et même les inclusions de verre qui se présentent parfois dans les interstices de grains étaient claires et sans altération. Aucune roche semblable ne pouvait s'être formée sur Terre.

Les compositions chimiques des laves lunaires montraient quelques différences importantes avec les basaltes terrestres. Les basaltes lunaires contiennent plus de titane, bien que la quantité de cet élément puisse varier largement, d'environ 3 à 5 pour cent de TiO_2 dans les échantillons d'Apollo 12 jusqu'à plus de 10 pour cent dans ceux d'Apollo 11. (La plupart des basaltes terrestres ne contiennent qu'environ 1 à 3 pour cent de TiO_2). Les basaltes lunaires ont aussi deux fois plus de fer que les basaltes terrestres et pratiquement tout le fer lunaire se présente comme le moins oxydé (ou ferreux) FeO , au lieu du plus oxydé (ferrique) Fe_2O_3 , qui accompagne FeO des laves terrestres.

Le caractère de moindre oxydation du fer contenu dans les roches lunaires indiquait qu'elles s'étaient formées dans des conditions d'absence presque complète d'oxygène libre. Cette idée fut confirmée par la découverte de petites quantités de fer métallique dans les laves lunaires.

Les minéraux lunaires fournissent certains détails intéressants et inattendus concernant la faible quantité d'oxygène libre présente pendant la période de refroidissement des laves. Quand une lave terrestre refroidit, la pression d'oxygène libre régnant dans la roche est de moins de cent millionième de la pression d'oxygène de l'atmosphère de la Terre. (La plupart des laves, même à la surface, sont si compactes que l'oxygène atmosphérique ne les pénètre pas pendant leur refroidissement). Cependant, même cette faible quantité d'oxygène est généralement suffisante pour oxyder le fer de la lave et pour la transformer en minéraux oxydés et en silicates, ne laissant aucune trace de fer à l'état métallique.

La découverte des petites quantités de fer métallique comme un minéral dans les laves lunaires prouve qu'il y avait encore moins d'oxygène libre disponible au moment de la formation des roches lunaires. Le fer et autres minéraux contenus dans les roches lunaires informent les géologues sur le fait que la pression d'oxygène des basaltes lunaires était le 1/100 000 (cent millième) de celle des basaltes terrestres, (**page 128**) et la Lune semblait avoir moins d'oxygène libre disponible qu'à l'intérieur même de la Terre.

D'autres éléments chimiques étaient moins abondants dans les roches lunaires que dans celles de la Terre, et ces relatives raretés apportèrent aussi une information importante sur la Lune. En plus de l'absence d'eau, les roches lunaires n'avaient qu'environ un dixième du sodium (Na) et du potassium (K) trouvés dans les laves terrestres. L'eau et les éléments alcalins, comme on appelle le sodium et le potassium, ont une chose importante en commun : ce sont tous des substances volatiles, ce qui fait qu'elles s'évaporent facilement d'une roche sous l'effet de son chauffage à haute température. L'absence de ces matériaux dans les roches lunaires suggérait que la matière solide qui forma la Lune avait été extrêmement chaude, peut être au dessus de $2\,000^\circ$, à un certain moment de l'histoire de la Lune. Pendant cette période primitive de chaleur, les substances volatiles (telles que l'eau et les éléments alcalins) s'évaporèrent de la Lune et se perdirent dans l'Espace. Malgré les nombreuses ressemblances entre roches lunaires et terrestres, là apparaît la preuve que l'histoire de la Lune a été très différente de celle de la Terre.

Ces résultats furent particulièrement décourageants pour ceux qui avaient espéré trouver de la vie

sur la Lune. Elle n'a pas été trouvée, que ce soit à la surface de la Lune ou dans les roches elles-mêmes. Et maintenant les roches nous disaient que la Lune n'avait pas d'eau et probablement pas d'oxygène libre, deux substances essentielles à la vie. La Lune n'a pas de vie maintenant, et les données chimiques obtenues à partir des roches rendent improbable qu'il n'y en ait jamais eu.

Les différences chimiques des roches lunaires ont aussi influé sur leur comportement au moment de leur première éruption. Comme les laves lunaires contenaient plus de fer et de titane, elles étaient plus fluides que les laves terrestres. La roche fondue à la surface de la Lune était à peu près aussi fluide que de l'huile lubrifiante, et donc une seule coulée de lave pouvait s'étendre rapidement à travers la Lune sur des centaines de kilomètres avant de se solidifier.

Aussi bien les basaltes lunaires que terrestres sont des mélanges de composants chimiques variés, **(page 129)** ayant tous des points de fusion différents. Donc, le basalte fondu liquide ne se fige pas d'un seul coup à une température unique, comme cela se produit pour une substance pure comme l'eau. Au contraire, un basalte liquide, en refroidissant, se solidifie progressivement à des températures variées, et les différents minéraux cristallisent à partir de l'état liquide à différents moments en fonction de la chute de la température.

En confrontant les résultats des analyses chimiques des différents minéraux lunaires avec ceux obtenus à partir des expériences de laboratoire effectuées pendant de nombreuses années, les scientifiques purent estimer les températures et les pressions auxquelles les laves s'étaient solidifiées. Quand les laves lunaires commencèrent à surgir puis à refroidir et à cristalliser, leur température avoisinait 1 200 °C (2 200 °F), soit à peu près la même température qu'au moment de l'éruption des laves basaltiques sur la Terre. Lorsque les laves lunaires refroidissaient, de plus en plus de cristaux se formaient à partir de la masse liquide, mais les roches ne devenaient pas complètement solides tant que la température n'était pas tombée aux environs de 950 °C (1 750 °F).

A l'information physique et chimique, le géologue pouvait ajouter les données de l'examen microscopique. A partir de la structure des roches, il pouvait établir les étapes de leur transformation depuis une roche chaude, fondue et liquide en une roche solide. Les tailles et formes des cristaux indiquaient que les roches s'étaient formées en se refroidissant relativement rapidement. Des géologues estimaient que les coulées de lave s'étaient solidifiées complètement en moins de quelques années. Cela signifiait que les coulées de lave devaient avoir moins de quelques dizaines de mètres d'épaisseur, parce que des couches plus épaisses auraient demandé des milliers ou des millions d'années pour se solidifier complètement.

Les structures préservées montraient avec quelle rapidité les cristaux s'étaient formés à partir du liquide originel. Au microscope, les scientifiques observaient des cristaux qui s'étaient formés si rapidement que le liquide environnant n'avait pas eu le temps de s'extraire. De nombreuses gouttelettes de liquide étaient réellement entourées et emprisonnées par les cristaux en formation (photo 19). Ces petites fractions isolées de liquide se refroidirent puis cristallisèrent sans aucune connexion avec le reste de la lave. **(page 130)** Certaines de ces gouttelettes piégées n'avaient qu'une fraction de millimètre de large. D'autres étaient assez grandes pour former leurs propres cristaux microscopiques, et ces plus grands éléments offraient aux scientifiques une chance d'étudier

différentes sortes de cristallisation dans la même roche et quelquefois dans le même cristal.

Les premiers cristaux à se former dans le basalte lunaire en cours de refroidissement sont habituellement l'olivine ou le pyroxène. Ces minéraux contiennent un plus grand pourcentage de calcium et de magnésium que la lave basaltique d'origine. La formation de ces minéraux fait donc sortir le calcium et le magnésium de la masse liquide. Au cours de la formation de ces minéraux, deux choses se produisent : la quantité de masse liquide restante est progressivement réduite et la masse liquide perd de plus en plus de calcium et de magnésium tout en s'enrichissant en tous les autres éléments.

Ce processus, appelé « cristallisation fractionnée », entraîne un changement continu de la composition de la masse liquide restante au fur et à mesure de la formation des cristaux. C'est très semblable au processus bien connu du gel de l'eau salée ; pendant qu'une partie de l'eau gèle sous forme de cristaux de glace pure, le sel devient de plus en plus concentré dans la saumure liquide restante.

Grâce au processus de cristallisation fractionnée dans les laves lunaires, de nombreux éléments chimiques qui étaient inhabituels et même rares dans la lave originelle, sont fortement concentrés dans la petite quantité de masse liquide qui reste quand la roche s'est solidifiée à plus de 95 pour cent. A ce point, le composant « silice », SiO_2 , devient si concentré dans la masse liquide restante que des minéraux composés de SiO_2 pure, appelés tridymite et cristobalite, se forment. Même des minéraux plus rares, contenant de grandes quantités d'éléments tels que le potassium, le zirconium et le soufre, ainsi que l'uranium et le thorium radioactifs, se forment aussi.

Un certain nombre de nouveaux minéraux, jamais observés sur Terre, furent aussi découverts dans les roches lunaires. Ces minéraux se formèrent en raison des conditions chimiques inhabituelles se présentant pendant le refroidissement des laves lunaires et notamment l'absence d'eau, et la pression d'oxygène anormalement basse. De nombreux minéraux furent trouvés sous forme de minuscules cristaux dans des fissures et dans des veinules où ils s'étaient cristallisés à partir de la dernière quantité de masse liquide restante dans la roche. La plupart de ces cristaux étaient si petits et de composition chimique si inhabituelle qu'ils ne purent être détectés et identifiés qu'au seul moyen de la microscopie électronique.

Un nouveau minéral, qui se présente sous forme de cristaux d'un jaune clair, est semblable au pyroxène, mais il est enrichi en fer en raison de la pression d'oxygène anormalement basse dans les roches lunaires. Son nom, le pyroxferroïte, dérive de sa ressemblance avec le pyroxène et le Fer.

Un nouveau minéral plus commun est un oxyde de fer opaque, de titane et de magnésium quelque peu semblable à l'ilménite. Son nom, l'armalcolite, associe les initiales des noms des astronautes d'Apollo 11 (ARMstrong, ALdwin, COLlins). Il fut trouvé dans les premiers échantillons rapportés par Apollo 11, et c'était un minéral banal dans les laves rapportées par Apollo 17 à partir de la Vallée Littrow qui se trouve à 1 000 kilomètres de là.

Un troisième nouveau minéral se présente sous forme de minuscules cristaux de couleur orange rouge, à la fois dans les basaltes d'Apollo 11 et d'Apollo 12. Appelé Tranquillityite, d'après la mer lunaire où il fut récolté pour la première fois, le minéral est composé essentiellement de fer, titane et

silice, mais il est parfois enrichi d'éléments rares comme le zirconium, l'yttrium et l'uranium. Le processus de cristallisation fractionnée a tellement concentré ces derniers éléments dans la Tranquillityite que les cristaux contiennent plus de 100 fois les quantités présentes dans le basalte originel.

Quelque soit l'endroit d'où venait les échantillons de mer lunaire rapportés par les missions Apollo, les roches témoignaient toutes du même simple processus de formation : solidification à partir de lave fondue. Les différences mineures qui existaient d'une « mer » à l'autre ne contredisaient pas cette conclusion générale. Les basaltes d'Apollo 12 par exemple, avaient moins de titane et étaient près de 400 millions d'années plus jeunes que les basaltes d'Apollo 11, mais ils s'étaient formés de la même manière. **(page 132)** En fait, les laves de « mers » étaient si semblables d'un site d'alunissage à l'autre que les scientifiques pouvaient être sûrs que toutes les régions sombres sur la Lune étaient faites de laves basaltiques.

Les laves venant des « mers » offraient une image de la Lune qui différait grandement de l'idée que l'on se faisait avant Apollo selon laquelle la Lune était un objet froid et primitif. L'existence de laves basaltiques signifiait que l'intérieur de la Lune avait été suffisamment chaud pour fondre. Les différents âges des laves suggéraient que la Lune était restée chaude et partiellement fondue pendant presque un demi milliard d'années. Les différences chimiques des laves indiquaient qu'il y avait également des variations chimiques significatives dans l'intérieur de la Lune ; chaque fournée de lave semblait, pour ainsi dire, être sortie d'un pot différent de roche fondue.

Nous eûmes la chance d'avoir aluni d'abord sur la « mer » lunaire où le sol était plat et les roches assez simples. L'étude des continents lunaires accidentés s'avérait être une affaire plus difficile. Les roches étaient plus compliquées et, dans tous les échantillons de roches continentales, les traces de cristallisation à partir des laves fondues étaient brouillées et perturbées par les épisodes catastrophiques d'écrasement, de mélange et de nouvelle fusion.

LES ROCHES DES CONTINENTS

Les laves lunaires des « mers » contenaient les traces détaillées de l'histoire de la Lune pour la période comprise entre moins 3,7 et moins 3,3 milliards d'années. Ces laves, cependant, formaient une fine écorce seulement, qui couvrait environ un cinquième de la surface de la Lune. Par ailleurs, les scientifiques pensent que le temps occupé par la coulée de laves, environ 400 millions d'années, représente moins du dixième de l'âge de la Lune. Les roches de « mers » ne fournissent aucune information sur les événements lunaires antérieurs à 3,7 milliards d'années.

Pour rechercher et pour apprendre ce que fut l'histoire **(page 133)** primitive de la Lune, les dernières missions Apollo se posèrent sur les continents lunaires. Les continents sont la plus ancienne partie de la Lune visible depuis la Terre. Dans ces régions de couleur claire, fortement cratérisées, qui couvrent les 4/5 de la surface de la Lune, est contenue l'histoire de ce qui arriva à la Lune pendant ses premières années, bien longtemps avant que n'apparaissent même les plus anciennes laves des « mers ».

L'alunissage d'Apollo 11 sur la Mer de la Tranquillité avait aussi fourni par hasard aux scientifiques des échantillons de roches de continents. Bien que les plus proches régions continentales

soient à plus de 50 kilomètres du site d'alunissage d'Apollo 11, quelques minuscules fragments blancs de roches riches en plagioclase furent prélevés des échantillons de régolite récolté par les astronautes. Les scientifiques suggéraient que ces fragments étaient des roches continentales qui avaient été projetées jusqu'à la « mer » lors des impacts de météorites. Cette identification fut confirmée quand de plus gros spécimens de roches continentales furent rapportés des Monts Apennins par Apollo 15, du Plateau Descartes par Apollo 16 et des montagnes entourant la Vallée Littrow par Apollo 17.

Comme les laves de « mers », les roches de continents sont toutes ignées et elles aussi furent formées par le refroidissement et la solidification de roche fondue. Mais leur composition chimique et minérale est tout à fait différente des échantillons de « mer ». Les roches continentales contiennent près de deux fois plus de calcium et d'aluminium que les laves de « mers », et elles ont en conséquence moins de titane, de magnésium et de fer. L'analyse des roches confirmait donc les analyses qui furent faites à partir de l'orbite lunaire (cf pp. 112-113), montrant que tous les continents étaient enrichis en calcium et aluminium.

Les différences chimiques entre roches de continent et de mer se retrouvent dans leur composition minéralogique. Les roches de continent et de « mer » contiennent les mêmes minéraux, mais les concentrations sont différentes. Les roches continentales, contenant plus de calcium et d'aluminium, ont beaucoup plus de plagioclase (le silicate de Ca et d'Al) que les laves de « mers ». **(page 134)** Le plagioclase constitue habituellement au moins la moitié des roches continentales, présentant des quantités variables de pyroxène, olivine et spinelle.

Comme les roches continentales contiennent les mêmes minéraux que les roches terrestres, les noms de roches terrestres pouvaient être utilisés pour les décrire. La plupart des roches continentales sont appelées *gabbro* un terme utilisé pour une roche qui contient de 50 à 75 % de plagioclase et de 50 à 25 % d'autres minéraux. Une roche de continent moins courante, appelée *anorthosite*, contient plus de 90 % de plagioclase et certains spécimens peuvent être du plagioclase pur sans aucun autre minéral. La Roche de la Genèse récoltée par les astronautes d'Apollo 15 et de nombreuses roches rapportées par la mission Apollo 16 étaient de l'anorthosite. Toutes roches contenant des quantités de plagioclase entre 75 et 90 % ont reçu habituellement des noms hybrides tels que *gabbro anorthositique* ou *anorthosite gabbroïque*, suivant la quantité de plagioclase et la préférence du géologue chargé de la nomenclature.

Malgré les différences chimiques majeures entre les roches de continent et de « mer », il y a aussi quelques ressemblances importantes. Les roches de continent ne contiennent pas non plus d'eau et pratiquement pas de sodium et de potassium. Ces résultats montraient aux scientifiques que la fuite des matériaux volatils était un caractère général de toutes les roches lunaires et non le résultat d'un processus particulier qui n'avait touché que les laves des « mers ». Cette notion renforçait le fait que tous les corps volatils s'étaient échappés de la Lune dès les premiers temps de son histoire. Peut-être s'étaient-ils évaporés des petites particules de matière solide qui constituaient le nuage de poussière originel longtemps avant la formation de la Lune. Les roches continentales contiennent aussi de petits grains de fer métallique, prouvant que des conditions de basse pression d'oxygène existaient aussi

bien dans les régions continentales que dans les « mers ».

Bien que les roches continentales et les laves de « mer » se formèrent toutes deux de la même manière par refroidissement et cristallisation de masses liquides fondues, elles apparaissent significativement différentes sous le microscope. Les laves de « mer » sont constituées de petits cristaux, (**page 135**) et leurs structures indiquent un refroidissement relativement rapide. Les cristaux vus dans les roches continentales sont plus grands et de formes plus régulières, et leurs structures indiquent un refroidissement plus lent et un temps de refroidissement plus long.

Les roches de « mer » se rapprochent beaucoup plus des laves terrestres qui font irruption des volcans à la surface de la Terre et se solidifient rapidement en quelques mois ou quelques années. Les roches continentales, par contre, ressemblent à d'autres roches terrestres qui se forment avec un refroidissement beaucoup plus lent de masses de matériau plus grandes et fondues dans la profondeur de la Terre. Si les roches continentales s'étaient formées en profondeur dans la Lune, où la perte de chaleur est lente, il aurait fallu des millions d'années pour qu'elles deviennent complètement solides. Une fois formées, elles peuvent avoir été poussées vers la surface à la faveur de grands bouleversements de la croûte lunaire ou soufflées en dehors par de grands impacts de météorites.

Les âges des échantillons « continentaux » mesurés jusqu'ici se retrouvent tous dans la fourchette de 4 à 4,2 milliards d'années, confirmant ainsi l'idée que les continents sont plus vieux que les « mers ». Cependant, les roches de continents sont encore plus jeunes que certaines météorites qui sont tombées sur Terre et datées de 4,6 milliards d'années. Des scientifiques pensent que la Lune s'est formée à cette période plus reculée avec les météorites et le reste du système solaire. Si cela est vrai, alors le premier demi milliard d'années de l'histoire de la Lune n'est pas encore connu, pas même grâce à l'étude des roches « continentales ».

Les opinions diffèrent sur ce que pouvait signifier cette lacune dans l'histoire de la Lune. Une explication est, qu'avec si peu d'alunissages « Apollo », nous n'avons pu trouver les plus vieilles roches lunaires existantes. Une autre théorie possible est que la Lune resta fondue pendant toute la période comprise entre 4,6 et 4,2 milliards d'années et qu'aucune roche solide ne se soit formée pendant cette période. Une troisième explication est que la Lune devint solide tôt dans son histoire, mais que les continents se formèrent il y a 4,2 milliards d'années lors d'un épisode majeur de nouvelle fusion touchant l'ensemble de la Lune. Une dernière éventualité est que les continents se formèrent très tôt (**page 136**) dans l'histoire de la Lune mais furent tellement écrasés et refondus il y a environ 4 milliards d'années qu'aucune roche plus ancienne ne survécut.

Nous ne savons pas encore quelle est la bonne explication. La période d'un demi milliard d'années qui sépare la formation de la Lune et du système solaire de celle apparente des plus vieilles roches « continentales » reste presque encore un mystère complet pour nous.

LES BRÈCHES : DES ROCHES VENANT DE TOUTE PART SUR LA LUNE

L'événement initial dans l'histoire des roches de « mers » ainsi que celle des « continents » est leur formation par solidification de lave fondue. Cependant, après leur solidification, les roches lunaires furent soumises à des forces variées qui les concassèrent et mélangèrent les morceaux ensemble pour former une nouvelle variété de roche appelée *brèches*.

Le terme « brèche » est utilisé depuis longtemps pour décrire des roches terrestres qui sont constituées de fragments de plus anciennes roches. Sur Terre, les brèches indiquent souvent l'écrasement de roches solides préexistantes sous l'effet d'événements brusques et violents tels que des éruptions volcaniques ou des mouvements brusques de la Terre associés aux séismes.

Bien qu'elles soient plus fréquemment trouvées dans les continents, des brèches ont été récoltées sur chaque site d'alunissage. Ce sont des roches complexes constituées de morceaux éclatés, écrasés et parfois fondus d'autres roches lunaires. Les constituants d'une brèche peuvent aller de minuscules particules de moins d'un millimètre de large à d'énormes blocs de plusieurs mètres de long. Les fragments peuvent être des roches ignées de nombreux âges et types différents, des inclusions et gouttelettes de verre ou des morceaux d'autres brèches.

La découverte de brèches sur la Lune prouve l'existence de mécanismes violents qui ont agi aussi bien sur les roches des continents que sur celles des « mers » depuis leur formation. **(page 137)** Deux processus possibles concernant la formation de brèches sur la Lune sont les impacts de météorites et les éruptions volcaniques, mais la plupart des scientifiques pensent maintenant que presque toutes les brèches récoltées ont été formées aussi bien par les impacts de petites météorites que par de gros astéroïdes.

Les brèches rapportées à partir des « mers », notamment par les missions Apollo 11 et 12 se présentent comme des mottes éparpillées, fragiles s'effritant facilement lors des manipulations. Sous le microscope, ce sont des roches complexes qui contiennent des morceaux du socle rocheux de lave, des grains dispersés de minéraux et de petites gouttelettes et fragments irréguliers de verre de toutes les couleurs, claire, verte, brune et orange (photo 20). Les fragments sont faiblement cimentés ensemble par de la fine poussière et du verre. Ces brèches semblent s'être formées lorsque de petites météorites percutèrent la surface lunaire et compactèrent le sol meuble en petites mottes qui furent dispersées dans et autour du cratère résultant.

Les brèches des continents se présentent sous une forme beaucoup plus grosse. Ici elles forment d'énormes amas qui peuvent recouvrir la surface sur des kilomètres d'épaisseur et s'étendre sur des milliers de km². Les astronautes qui se posèrent sur les continents ne récoltèrent rien d'autre que des brèches et il est probable que même les quelques spécimens de roches ignées solides ramassées étaient des fragments de brèches plutôt que des fragments du socle rocheux proche.

La formation Fra Mauro, échantillonnée par Apollo 14, et la formation Cayley sur laquelle se posa Apollo 16, sont maintenant considérées comme étant deux étendues de brèches qui furent déposées par les énormes impacts qui formèrent les bassins de Mare Imbrium et de la Mer Orientale.

Sur le site d'Apollo 14 plusieurs différentes sortes de brèches furent récoltées. L'une est très riche en plagioclase, et les géologues pensent qu'elle se forma par l'écrasement et le mélange de roches continentales riches en plagioclase. Sur le site d'Apollo 16 **(page 138)** près du cratère Descartes, des brèches semblables furent récoltées dont beaucoup contiennent des fragments de grandes taille de roches riches en plagioclase fortement écrasées.

De nombreuses brèches, dans les deux formations Fra Mauro et Cayley, contiennent une grande quantité de matériau anciennement fondu ressemblant à de la lave. Des géologues pensent que, au

moment des événements du grand impact ayant formé les bassins de « mer », une grande partie de la roche originelle fut fondue sous l'effet de la force de l'impact. Ce matériau fondu fut inclus dans la roche brisée déposée en couches autour des bassins, et en de nombreux endroits, la chaleur et la roche fondue soudèrent ensemble des éléments de la brèche pour former une roche d'une solidité inhabituelle (photo 21). De nombreux spécimens de ces impactites polygéniques à fort taux de fusion (impact melt) comme sont appelés de telles roches fondues, furent récoltées sur le site d'Apollo 16. Ils ressemblent à la lave volcanique si ce n'était le grand nombre de fragments rocheux qu'ils contiennent.

L'action de la chaleur pendant la formation de ces couches de brèches a produit certains effets inhabituels dans des spécimens de la formation Fra Mauro récoltés sur le site d'Apollo 14. Regroupés dans de petites anfractuosités et fissures des échantillons de brèches, se trouvent de minuscules cristaux de fer métallique et de phosphate de calcium appelé apatite (photo 22). Les cristaux sont trop fragiles pour s'être formés à partir de liquide et les géologues qui les ont étudiés sont convaincus qu'ils s'étaient déposés directement à partir d'une vapeur chauffée qui remplissait les fissures aussitôt après que la couche de brèche se soit déposée sous forme d'une masse de décombres brûlants sur la surface de la Lune. La présence de chaleur et de gaz favorise aussi la soudure de la couche de brèche peu liée à l'origine, en une roche absolument compacte.

La formation de cristaux à partir de gaz chauds est un phénomène habituel autour des volcans terrestres, où du soufre solide est le minéral le plus communément observé. Bien qu'aucun cristal de soufre n'ait été détecté dans les brèches d'Apollo 14, les minéraux trouvés montrent que les brèches furent déposées sur la Lune à des températures élevées, peut-être au dessus de 500 °C (932 °F) et que du gaz était présent au moment de leur formation. Étant donné l'absence d'atmosphère sur la Lune (**page 139**) et la sécheresse des roches lunaires, la preuve qu'un gaz de composition inconnue ait existé au moment de la formation des brèches, fut un des résultats les plus remarquables découlant des analyses des échantillons d'Apollo 14.

L'étude des brèches lunaires n'a pas été aussi facile, aussi rapide ou aussi simple que l'étude des laves de « mers ». Les laves représentent un type de roche uniforme et facile à déterminer, alors qu'un échantillon de brèche de « continent » doit être soigneusement inspecté millimètre par millimètre pour identifier tous les composants et pour déchiffrer leurs différentes histoires individuelles conservées dans un échantillon unique. L'examen des brèches lunaires n'est pas complet ; pour de nombreux échantillons, il n'a même pas commencé.

Néanmoins, le temps passé sur les brèches lunaires représente un bon investissement. De toutes manières, les brèches sont plus importantes pour les scientifiques que ne le sont les laves lunaires. Les laves sont un type de roche unique dont l'âge est précis et l'histoire simple. Dans les brèches, les scientifiques peuvent trouver de nombreux composants différents, chacun ayant sa propre histoire, et qui ont été probablement rassemblés à partir de lieux d'origine répartis sur toute la surface de la Lune. Dans les brèches lunaires, les scientifiques peuvent observer une beaucoup plus grande variété de types de roches que celles qui pouvaient être récoltées dans le socle rocheux de n'importe quel point de la Lune. Les brèches ont enregistré des événements de l'histoire de la Lune postérieure à la

formation des roches compactes. Elles ont enregistré ce qui arrive quand un astéroïde percute la Lune, combien de fois cela s'est produit, avec quelle rapidité les roches sont détruites sur la surface lunaire, comment le matériau est transporté d'un point à un autre de la Lune et à quoi ressemblait la surface lunaire il y a des millions ou des milliards d'années.

Il n'est pas surprenant que la roche la plus bizarre rapportée par les missions Apollo soit une brèche, une petite pierre de la taille d'un citron (échantillon 12013) ramassée par Charles Conrad sur la surface de l'Océan des Tempêtes à la fin de la première campagne d'échantillonnage de la mission Apollo 12. Analysée sur Terre, sa composition et son âge s'avérèrent être uniques, différents de n'importe quelle autre roche lunaire connue. Elle contient 61 % de SiO₂, (**page 140**) alors que les laves associées n'en ont que 35 à 40 %. Plus surprenant, elle contient 40 fois plus de potassium, uranium et thorium que les laves, faisant d'elle une des roches les plus radioactives jamais récoltées sur la Lune. Son âge fut évalué à 4 milliards d'années, comparé à l'âge de 3,3 milliards d'années des laves provenant du même site.

Malgré tous les efforts faits pour cette unique pierre, son origine et son histoire ne sont pas encore éclaircies. La roche est en fait composée de trois matériaux différents : une brèche gris sombre, une brèche gris clair et ce qui ressemble à une veine de lave solidifiée. Comment se formèrent les différents composants de cette roche et quels sont leurs âges relatifs, n'est pas encore compris. Cette pierre unique, avec sa composition chimique unique et son lieu d'origine inconnu, est là pour nous rappeler constamment que nous avons encore beaucoup à apprendre sur la Lune.

CHAPITRE 7

LE RÉGOLITE

Exceptés les murs du sillon Hadley, les astronautes d'Apollo ne trouvèrent pas de socle rocheux compact découvert sur la Lune. Presque partout le socle rocheux lunaire est enfoui sous une couche de matériau pulvérulent, friable, en général de plusieurs mètres d'épaisseur, qui forme la surface réelle de la Lune. Toutes les roches récoltées par les astronautes furent des fragments et morceaux dispersés de cette couche de surface.

La nature et l'origine de cette couche de décombres lunaires, communément appelée « régolite » (ou « régolithe ») sont un problème important dans l'étude de la Lune, et la récolte de spécimens du régolite fut un but majeur des missions Apollo. En fait, il s'avéra impossible de ne pas le récolter car il collait partout. Il revint sur Terre dans des sacs d'échantillons et sous forme d'enrobages de plus grandes roches. Il collait aux scaphandres lunaires et s'infiltrait dans le Module Lunaire à partir de la surface du sol. Il recouvrait les films et les appareils photographiques et envoya plusieurs techniciens consternés dans une quarantaine inattendue avec les astronautes au moment de l'ouverture des équipements de bord. Pour les astronautes, le régolite fut une réelle nuisance pour un bon aménagement de leur séjour dans l'espace. **(page 142)** Pour les ingénieurs, ce fut un danger potentiel pour la machinerie délicate et exigeante du vaisseau spatial. Pour les géologues, le régolite fut l'un des matériaux les plus compliqués et excitants rapportés de la Lune.

Le régolite est en fait une brèche effritée contenant de nombreux éléments différents. Même dans les plus petits fragments de la taille d'une fraction de millimètre, se trouvait une immense variété. A partir d'une petite pincée de régolite, des géologues peuvent isoler de minuscules fragments de roches, des morceaux d'un seul cristal, des particules contenant du verre sous forme de débris irréguliers et de très fines sphères et gouttelettes de verre compact dont la couleur varie du vert clair ou pale à l'orange et au rouge brun.

Presque tous les fragments de roche semblent venir du socle rocheux situé immédiatement sous le régolite. Sur les « mers », les fragments de roche sont du basalte et les différents cristaux sont du pyroxène, du plagioclase, de l'ilménite et autres minéraux trouvés dans le basalte. Les régolites des continents qui se trouvent au dessus d'épaisses couches de brèches, sont composés principalement de fragments de roches riches en plagioclase.

Les roches lunaires pourraient être comparées facilement aux roches terrestres, mais le régolite était une chose entièrement étrangère à notre expérience de terriens. Contrairement aux sols terrestres, le régolite ne montre aucun stigmate de l'action du vent ou de l'eau. Il ne contient ni roches érodées, ni matière organique, ni signe de vie. Il n'y a pas de mot dans le vocabulaire de géologie terrestre pour le

décrire avec précision. Certains scientifiques l'ont appelé « régolite » ; la plupart l'appelèrent « sol lunaire » et se contentèrent de cela ³².

(page 143) Le caractère unique du régolite est expliqué par son origine unique. Le « sol » contient la preuve évidente qu'il fut formé par les impacts continuels de météorites, un processus auquel aucun sol terrestre ou lit de cendre volcanique ne pouvait avoir été soumis.

Les scientifiques reconnaissaient, même avant le Programme Apollo, que la surface de la Lune, privée de protection par une atmosphère, pouvait être bombardée continuellement par de grands et petits éléments de matière solide (c'est à dire des météorites), qui voyageaient à travers le système solaire. Ces impacts auraient brisé le socle rocheux partout où il était découvert et, sur une période de millions ou de milliards d'années, auraient fini par élever une couche de débris effrités. Les images de Ranger et d'Orbiter montraient l'existence de cette couche de matériau écrasé avec tellement de précision qu'il était possible de mesurer l'épaisseur de la couche (en général 5 à 15 mètres) à des emplacements divers sur la Lune.

Les échantillons de régolite rapportés par Apollo 11 montraient à l'évidence que le « sol » avait été produit par l'effet pulvérisant du bombardement météoritique et par quelque différent processus tel que des éruptions volcaniques. La preuve des effets violents de l'impact des météorites est visible partout sur le « sol ». Le matériau qui le compose a été moulu très finement, et la taille moyenne des particules est de moins d'un dixième de millimètre. Tous les fragments de roche dans le « sol » sont anguleux et fracturés, montrant qu'ils furent produits par des roches compactes concassées.

Les gouttelettes de verre solide du régolite ne ressemblent pas aux particules de verre irrégulier à cassures coupantes d'obsidienne trouvées dans les cendres volcaniques terrestres. Au contraire, les verres lunaires semblent s'être formés à partir de jets de roche fondue qui furent vaporisés en dehors des cratères d'impact et transformés en minuscules perles (photo 23). D'autres fragments de verre dans le régolite montrent les effets de la fusion brusque à haute température produite par l'impact d'une météorite ; les cristaux partiellement fondus et les spirales de verres incomplètement mélangées trouvés dans ces spécimens sont totalement différents des structures produites par le refroidissement régulier de la cristallisation d'une roche volcanique. **(page 144)** De nombreux fragments isolés dans le régolite possèdent de minuscules dépressions sur leur surface, que l'on appelle microcratères. Ces « trous », d'une fraction de millimètre de diamètre et souvent tapissés de verre, sont formés par l'impact de particules cosmiques de la taille d'un grain de poussière se propageant à la vitesse de plusieurs kilomètres par seconde.

Le régolite contient aussi des restes de véritables particules ayant percuté la Lune. De petits fragments d'alliage nickel-fer dont sont faits des météorites ont été trouvés dans des échantillons de

32. Au sens strict, « sol lunaire » est incorrect pour le matériau lunaire parce que le terme s'accorde à du matériau terrestre formé par l'érosion de la roche et l'activité d'organismes ; mais aucun des ces processus ne se réalise sur la Lune. « Régolite » est un peu plus précis, parce que le terme, alors qu'il était formulé à l'origine pour la géologie terrestre, désigne un dépôt en forme de couverture meuble qui constitue la surface et recouvre le socle rocheux compact situé en dessous. Cependant, « sol lunaire » est un terme qui convient mieux et la plupart des gens de terrain le trouvent adéquat. (NDT : le terme « régolite » sera utilisé dans cette traduction)

régolite. Des tests ont été faits sur le régolite pour la recherche d'éléments chimiques tels que l'or, le platine, l'iridium, qui sont rares dans les roches lunaires mais plus communs dans des météorites. Les analyses montrent que 1 à 2 % de matériau météoritique a été mélangé avec les roches lunaires moulues.

Tous ces faits réunis montrent que le régolite fut formé par le bombardement continu de la Lune par des particules cosmiques pendant des milliards d'années. Il n'est pas besoin de calculs précis pour se rendre compte que cela est un processus lent ; cela a demandé trois milliards et demi d'années pour construire une couche de débris de moins de 20 mètres d'épaisseur sur les « mers » lunaires.

IMPACT DE MÉTÉORITE : LE PULVÉRISATEUR COSMIQUE

Bien que théoriquement toute la matière solide du système solaire soit concentrée dans le Soleil, les planètes et leurs satellites, il y en a encore une infime fraction qui reste libre bien que sous forme de plus petits corps solides. Ces plus petits corps se présentent sous toutes les tailles, de la particule microscopique de poussière cosmique de moins d'un millième de millimètre de diamètre aux astéroïdes massifs de centaines de kilomètres de large. Ces particules solides, qui représentent une grande variété de tailles, ont reçu plusieurs noms. Les plus petites particules, avec des diamètres de moins d'un millimètre, sont appelées poussières cosmiques ou « micrométéorites ». Les plus grands corps, qui peuvent avoir des diamètres de quelques centimètres à quelques mètres, sont appelés techniquement « météorites » quand ils traversent l'espace. **(page 145)** Quand un de ces objets percute l'atmosphère de la Terre, il devient un « météore », produisant une trace brillante de lumière, souvent appelée « étoile filante ». Si un de ces corps traverse l'atmosphère et percute la terre, la partie restante est appelée « météorite ». D'autres plus grands corps, de centaines de mètres à des centaines de kilomètres de diamètre, sont des planétoïdes ou astéroïdes. La plupart de ces corps se trouvent dans la « ceinture d'astéroïdes » entre Mars et Jupiter, mais certains d'entre eux peuvent traverser l'orbite terrestre et s'en approcher réellement. CÉRES, le plus grand astéroïde connu, a environ 775 kilomètres de diamètre, soit un cinquième du diamètre de la Lune environ.

Tout ce matériau solide voyage avec les planètes autour du Soleil, mais les orbites des plus petits corps traversent souvent celles des plus grandes planètes, et occasionnellement un de ces petits objets percute la Terre ou la Lune.

Ces corps solides viennent de plusieurs sources du système solaire. Certains d'entre eux et en particulier les plus grands astéroïdes, sont des « restes » de matériau qui ne furent pas intégrés aux grosses planètes lors de la formation du système solaire. Cependant, de nombreux corps sont d'origine plus récente, ayant été produits par des collisions continues d'astéroïdes dans la ceinture entre Mars et Jupiter. D'autres particules solides, spécialement les petites, peuvent être produites par la désintégration de comètes alors qu'elles se dirigent vers le Soleil en provenance de régions extérieures au système solaire.

Avant le Programme Apollo, notre connaissance de ces plus petits morceaux de matière du système solaire était limitée à ce que nous pouvions apprendre de la Terre. Nos informations sont en grande part relativement récentes. Le premier astéroïde connu, Cérés, fut seulement découvert en 1801. Les météorites n'étaient généralement pas reconnus comme des objets d'origine extraterrestre jusqu'au

début du 19^{ème} siècle, et des études détaillées de météorites récoltées après leur chute ont été activement poursuivies depuis quelques décennies seulement. L'information sur la nature et la quantité de poussières et de micrométéorites qui percutent la Terre est encore insuffisante.

Pendant les années 1960, quand l'intérêt pour l'exploration spatiale était en plein essor, les météorites et autre matière extraterrestre étaient étudiées intensément pour plusieurs raisons. **(page 146)** Pour l'une, ils représentaient un échantillon de matériau à partir duquel le système solaire s'était formé. De plus, la fréquence avec laquelle ils heurtent la Terre pouvait servir à calculer le nombre et la taille de tels objets dans le système solaire. Finalement, comme les météorites doivent heurter toutes les planètes, les effets produits par les météorites heurtant la Terre étaient importants à connaître pour comprendre comment les surfaces des autres planètes avaient pu se former et évoluer.

Les scientifiques apprirent qu'il y avait une relation simple entre la taille de ces objets solides et leur abondance : les petites particules étaient de loin plus nombreuses que les grandes. En d'autres termes, il y a probablement moins de 20 astéroïdes mesurant plus de 100 kilomètres de diamètre mais par contre des millions de micrométéorites qui ont moins d'un millimètre de diamètre, rencontrent l'atmosphère terrestre, chaque jour.

Malgré la relative abondance de ces plus petites particules, le « vide » spatial est encore pratiquement vide. Une seule particule de la taille d'une tête d'épingle est trouvée, en moyenne, dans un volume de plusieurs kilomètres cube d'espace, et, aussi bien les calculs que l'expérience ont montré que ces particules ne menaçaient ni le vaisseau spatial ni les astronautes sur la Lune. La Terre cependant est un grand objet, et au cours de sa ronde autour du Soleil, elle ramasse environ 50 000 tonnes de poussière cosmique par an ou environ 135 tonnes par jour³³. La presque totalité de cette masse pénètre dans l'atmosphère terrestre **(page 147)** sous forme de particules de moins d'un millimètre de diamètre. De telles minuscules particules ne sont pas vues pendant leur chute sur la Terre, mais elles ont été récoltées dans des sédiments de fonds marins et dans les strates des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique. Certaines particules extraterrestres ont aussi été récoltées directement par des avions en haute altitude. Il peut être difficile de distinguer les particules d'origine extraterrestre de particules similaires produites par l'activité industrielle et par des éruptions volcaniques terrestres. Ces particules ont souvent les mêmes tailles et les mêmes formes que celles d'origine extraterrestre et un examen microscopique soigneux ou des tests chimiques peuvent être nécessaires pour les différencier.

33. Des évaluations très variables du rythme auquel de la matière extraterrestre tombe sur Terre ont été réalisées par différentes méthodes. Les données provenant des détecteurs de micrométéorites placés en orbites terrestres dans des satellites ont rapporté des valeurs allant de 1 à 5 millions de tonnes par an, mais nombre de ces résultats sont maintenant considérés avec circonspection, en raison de l'existence de faux signaux produits par les détecteurs. Les plus basses valeurs citées ici proviennent d'études faites sur des carottages de glace et sur les sédiments de fonds marins qui se forment lentement et offrent donc une plus longue période d'échantillonnage. Le juste milieu est probablement situé entre 50 000 et un million de tonnes par an. C'est une quantité insignifiante comparée au poids de la Terre ; il faudrait 4 milliards et demi d'années pour accumuler suffisamment de poussière cosmique et augmenter le poids de la Terre d'un millionième de sa valeur.

De plus grandes particules (météorites), de la taille d'une tête d'épingle à celle d'une balle de golf, peuvent se manifester au moment de leur entrée dans l'atmosphère terrestre de façon brusque. Se propulsant à une vitesse comprise entre 10 et 20 kilomètres par seconde, elles heurtent l'atmosphère et se consomment, provoquant le phénomène familier des « étoiles filantes » vues dans le ciel nocturne. Ces petits corps sont suffisamment communs pour qu'un observateur puisse en voir plusieurs au cours d'une seule nuit claire, et à certains moments de l'année des pluies de grands météores telles que les Perséides ou les Léonides remplissent le ciel de raies lumineuses. Ces démonstrations de la nature mettent en relief la protection offerte par notre atmosphère ; sans elle, nous serions continuellement criblés de petites particules qui se propagent plus vite que des balles de fusil.

Moins fréquemment, peut-être une ou deux fois par an, un corps pesant quelques centaines de grammes ou plus survivra à son passage à travers l'atmosphère, brûlant en surface pendant qu'il ralentit au cours de sa chute et percute le sol en partie ralenti par rapport à sa vitesse de départ. La chute d'une telle météorite s'accompagne souvent d'un éclair de lumière, d'une traînée de fumée dans le ciel, de bruits sourds de tonnerre. Habituellement la météorite fait un trou de petite taille dans le sol, trou dans lequel il est retrouvé pour devenir un objet d'étude scientifique.

Bien que la plupart des météorites découvertes pèsent moins d'une centaine de kilogrammes et ne font que de petits creux dans le sol, de plus grands corps ont aussi percuté la Terre, produisant de beaucoup plus violents effets. Le 12 février 1947, une pluie de grandes météorites de fer percuta (**page 148**) la région de Sikhote-Alin en Sibérie, formant plus de trente cratères séparés, le plus grand d'entre eux avait 26,5 mètres de diamètre. Les scientifiques qui étudièrent la chute conclurent que la météorite en cause, qui pesait environ 70 tonnes, se brisa en plus petits morceaux lors de sa traversée de l'atmosphère, si bien que tous les fragments ralentirent en tombant et percutèrent le sol à des vitesses de quelques centaines de mètres par seconde seulement. Si la masse d'origine était restée intacte, elle n'aurait été que légèrement ralentie et aurait percuté le sol à près de 10 kilomètres par seconde. L'impact aurait dégagé l'énergie d'environ 500 tonnes de TNT, creusant un cratère de 100 mètres de diamètre environ.

Un objet extraterrestre beaucoup plus grand et moins expliqué heurta la Sibérie près de 40 ans plus tôt. Le 30 juin 1908, la région Nord du Lac Baïkal et la ville d'Irkoutsk, près de la Rivière Podkammenaya Tunguska, fut secouée par une forte détonation alors qu'un gros objet traversait l'atmosphère. Cet « événement Tunguska » fut probablement la collision la plus violente sur la Terre par un objet extraterrestre, au cours de l'histoire connue :

« D'anciens arbres, la majestueuse taïga Yeniseï, furent déracinés et entassés en une couche épaisse par l'onde de choc. Des gaz chauds brûlèrent la végétation de surface sur des dizaines de kilomètres alentour et le bruit de l'explosion se transmit à des milliers de kilomètres. Les sismographes enregistrèrent un tremblement de terre ; l'onde enregistrée par de nombreuses stations météorologiques fit deux fois le tour de la Terre. La chute de la météorite fut observée par des habitants en de nombreux endroits dans un rayon de 600 à 1000 kilomètres au centre de la Sibérie. Les quelques nuits suivantes furent extraordinairement claires et des nuages brillants furent observés jusqu'à des latitudes de plus de 45 ° en Asie de l'Ouest et en Europe. L'atmosphère de la Terre, qui

était imprégnée d'une grande quantité (**page 149**) de poussière météoritique, fut notablement obscurcie³⁴. »

Malgré la violence des phénomènes atmosphériques, aucune trace du corps extraterrestre ne fut trouvée. L'étude méticuleuse du site a permis de trouver quelques minuscules billes de verre, mais la nature de l'objet de la Tunguska est encore un mystère. Une explication plausible est que le corps était une tête de comète fragile, constituée de petites particules solides et de gaz gelé, entièrement désintégrée dans l'atmosphère. Des explications plus spéculatives et moins vraisemblables avancent que ce corps était un vaisseau spatial fuytif, un fragment d'antimatière, ou (plus récemment) un trou noir. Quelle que soit sa nature, l'Événement Tunguska délivra autant d'énergie qu'une grosse bombe à hydrogène (environ 2 millions de tonnes de TNT). Heureusement, l'explosion se produisit sur une région inhabitée ; si l'objet était entré dans l'atmosphère cinq heures plus tard, il aurait explosé au dessus de la ville de Leningrad. (ndt : maintenant Saint Petersburg).

Les données de l'histoire montrent clairement que, en moins d'un siècle, la Terre a été heurtée par de nombreux objets extraterrestres pesant de quelques kilogrammes à plus de 50 tonnes, et il y a toute raison de penser que de beaucoup plus grands objets ont percuté la Terre dans le passé lointain des temps géologiques. Les effets de collision de ces grands objets seraient de loin plus catastrophiques car les grands objets ne sont pas ralentis par l'atmosphère. Un corps de guère plus de 1 000ⁿ tonnes, correspondant à une météorite sphérique de 7 mètres seulement de diamètre, ou à peu près la taille d'un garage pour une seule voiture, traverserait l'atmosphère et percuterait la surface de la Terre à sa vitesse cosmique d'origine, soit 10 à 20 kilomètres par seconde ou plus. L'énergie dégagée par cette collision (**page 150**) est difficile à imaginer³⁵. L'impact serait équivalent à l'explosion de 20 000 tonnes de TNT (environ l'énergie de la première bombe atomique) et produirait un cratère de plus de 200 mètres de diamètre, assez grand pour contenir plusieurs terrains de football.

L'impact d'une grande météorite, voyageant à sa vitesse cosmique d'origine, est presque en fait une collision entre une force irrésistible et un objet immobile. La Terre arrête instantanément la météorite en pleine vitesse en une fraction de seconde, et l'énergie extraordinaire et terrifiante du mouvement de

34. E. L. Krinov, « Giant Meteorites », traduit du russe par J. S. Romankiewicz (New York : Pergamon Press, 1966) pp. 125-126. Ce livre apporte un exposé détaillé et agréable à lire de l'étude scientifique de l'événement de la Tunguska et la pluie de météorites de Sikhote-Alin. Les deux régions étaient si isolées que les difficultés pour les atteindre représentent à elles seules une aventure fascinante.

35. Mais elle est facile à calculer. L'énergie cinétique (énergie de mouvement) de la météorite est donnée par :

$$KE=1/2 MV^2$$

où M est la masse, et V est la vitesse au moment de l'impact. En donnant la masse en grammes et la vitesse en centimètres par seconde, cela donne l'énergie en ergs. Si nous admettons une vitesse moyenne de 15 kilomètres/ seconde pour une météorite de 1 000 tonnes, cela donne : M= 10⁹ grammes et V= 15 x 10⁵ cm/seconde. (Un nombre 10ⁿ est équivalent à 1 suivi de n zéros ; c'est la façon admise d'écrire les grands nombres).

Alors : KE= 1/2 (10⁹) (15 x 10⁵)² = 11,2 x 10²⁰ ergs.

Un kilotonne de TNT (1 000 tonnes) est équivalent à 4,19 x 10¹⁹ ergs donc l'énergie calculée est de 26,8 kilotonnes.

la météorite est transmise dans la Terre sous forme d'ondes de choc intenses dont les pressions peuvent atteindre plusieurs millions d'atmosphères (figure F p. 153). La plus grande partie de cette énergie est utilisée au point d'impact pour écraser et fondre la roche et pour creuser un grand cratère, mais une fraction de l'énergie peut se transmettre sur de longues distances sous forme d'une onde sismique identique à celles produites par les tremblements de terre.

Les scientifiques ont créé des formules mathématiques pour exprimer les relations entre la taille des corps « impactants », l'énergie de l'impact, et la taille du cratère résultant. Le problème dans ces calculs est que l'énergie de l'impact, qui équivaut à l'énergie de mouvement ou énergie cinétique (KE) de la météorite dépend à la fois de la masse (M) de la météorite et de la vitesse d'impact (V) de telle manière que $KE = \frac{1}{2} MV^2$. Donc, la même taille de cratère peut être produite soit par un petit corps arrivant à grande vitesse, soit par un corps plus massif arrivant plus lentement.

(page 151) Les rapports entre l'énergie de l'impact et la taille du cratère produit sont plus compliqués et deviennent de plus en plus imprécis pour des cratères d'un kilomètre de diamètre environ. En règle générale, le cratère produit a un diamètre d'environ 50 fois celui du corps « impactant », et le volume de roche écrasée et expulsée du cratère correspond, au moins, à plusieurs centaines de fois le volume du corps impactant. La plus grande partie de cette roche écrasée et éjectée est déposée à l'intérieur d'un périmètre correspondant à deux fois le diamètre du cratère, mais une petite fraction est éjectée à de beaucoup plus grandes distances, surtout sur un corps céleste sans atmosphère comme la Lune. Malgré les incertitudes des calculs, la capacité de grands impacts de météorites à pulvériser et à remodeler la surface d'une planète est indubitable.

Nous n'avons pas besoin de regarder loin dans le passé pour trouver les traces de tels grands cratères sur la Terre. Plus d'une douzaine de cratères d'impact sont connus pour s'être formés au cours des 50 000 dernières années. On les trouve dans les régions désertiques où ils ont été conservés et des morceaux de météorite de fer et de roche fondue sont retrouvés dans et autour des cratères. Alors que la plupart des cratères ont moins de quelques centaines de mètres de diamètre, Meteor Crater, dans le Nord de l'Arizona (photo 24), a plus d'un kilomètre de diamètre et près de 200 mètres de profondeur. Ce cratère est entouré de fragments de météorites de fer. Le corps originel qui produisit le cratère avait probablement 25 mètres de diamètre et pesait environ 65 000 tonnes. L'impact dégagait une énergie équivalente à près de 2 millions de tonnes de TNT, environ la même quantité dégagée lors de l'Événement Tunguska de 1908. L'étude géologique de la Terre a progressivement apporté la preuve que même de plus grands corps, dont certains de plusieurs kilomètres de diamètre, frappèrent la Terre il y a des millions d'années. Ces plus anciennes structures ont été difficiles à identifier. Elles sont si vieilles qu'aucun matériau météoritique originel n'est conservé, et elles ont été si profondément érodées que leur cratère originel a vu leur forme effacée, tout ce qui reste étant une zone circulaire de roches fortement déformées et écrasées. **(page 152)** De nombreux géologues débattent sur ces structures curieuses d'explosion fantôme qu'ils pensent être dues à des éruptions volcaniques, alors que d'autres pensent qu'elles ont des impacts pour origine. Depuis plusieurs décennies, la même controverse impactisme ou volcanisme lors de l'étude des cratères lunaires, était concentrée sur des structures terrestres, sans solution. Un progrès dans l'étude

de ces structures se fit dans les années 1960, quand des géologues mirent au point de nouvelles méthodes pour identifier les anciennes structures d'impact de météorite. Ces nouveaux critères sont fondés sur le fait que l'on s'est rendu compte que l'énergie terrifiante de l'impact est transmise dans les roches environnantes par d'intenses ondes de choc. Il en résulte que les roches situées autour du cratère d'impact sont soumises à des pressions et des températures plus élevées que celles développées par n'importe quelle éruption volcanique. Ces conditions uniques en leur genre produisent des changements spécifiques et définitifs dans les roches appelées « déformations de choc ». Ces effets comportent un éclatement et un écrasement, aspects de déformation unique propres à des minéraux, des effets inhabituels de fusion à haute température, et la formation de curieuses brèches riches en verre (photo 25). **(page 154)** Ces effets ont été reproduits en laboratoire avec des essais reproduisant des ondes de choc, dans des explosions nucléaires et dans des roches provenant de jeunes et indubitables cratères météoritiques. Ils n'ont pas été observés dans les roches volcaniques, même dans celles formées par des explosions, et il y a maintenant peu de raison de douter que ces effets de choc uniques en leur genre sont des indices d'anciens impacts de météorites.

#####

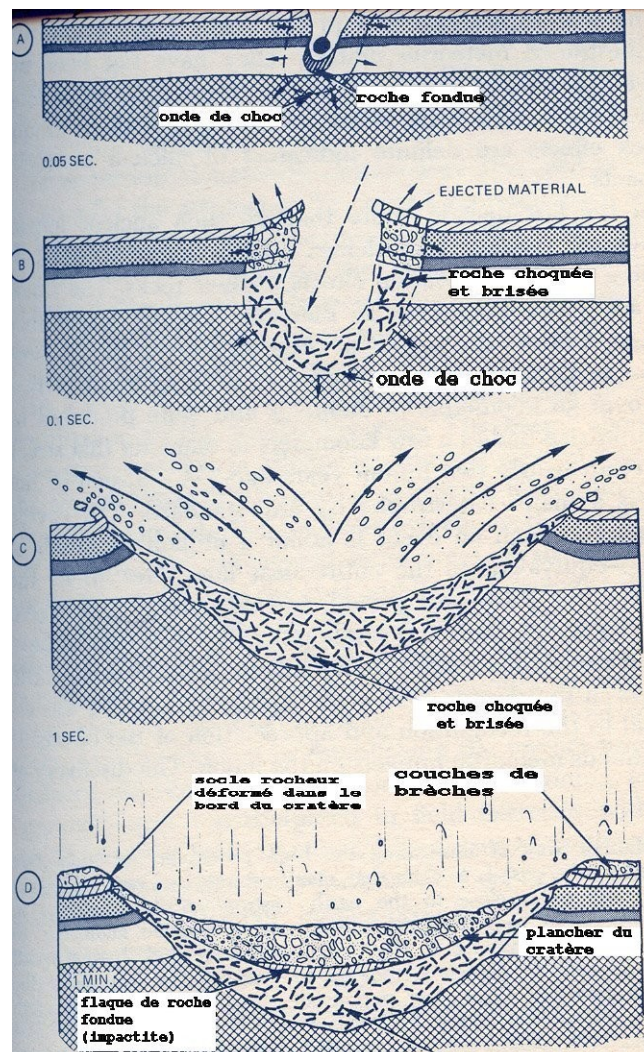


Figure F (page 152) L'excavateur cosmique. Cette série de coupes montre la formation et le creusement d'un cratère d'impact météoritique produit par un corps percutant une série de différentes couches de roche, à la vitesse de 10 à 20 kilomètres par seconde. Les nombres inscrits sous chacune des coupes indiquent le temps écoulé à partir de l'impact. Initialement (A) la météorite pénètre sur une profondeur de plusieurs fois son propre diamètre dans la roche cible, faisant fondre la roche la plus proche et provoquant d'intenses ondes de choc rayonnantes. Un instant après, (B) les ondes de choc commencent à briser la roche environnante et à l'éjecter vers le haut et en dehors. La poursuite du processus (C) creuse un cratère de nombreuses fois plus grand que la météorite elle-même. Le matériau éjecté est immédiatement déposé à la fois dans et autour du cratère sous forme de brèches (D). La structure finale, formée une minute environ seulement après l'impact initial, montre de nombreux aspects caractéristiques des cratères d'impact météoritique : roches très déformées et soulevées sur le bord, roches brisées et choquées sous le plancher du cratère, et couches de brèches et d'impactites dans le cratère lui-même. (Modifié, d'après E. M. Shoemaker, « Impact mechanics at Meteor Crater, Arizona » dans « The Moon, Meteorites, and Comets », B. M. Middlehurst et G. P. Kuiper, eds (Chicago : University of Chicago Press, 1963), pp. 301-36.

Dans la dernière décennie, plus de 50 anciennes structures d'impact (appelées astroblèmes) ont été identifiées en trouvant dans leurs roches des effets de déformation de choc. Les plus petits ont quelques kilomètres de diamètre, un peu plus grand que Meteor Crater. Les plus grandes de ces structures, le Bassin de Sudbury au Canada et l'Anneau de Vredefort en Afrique du Sud, ont plus de 50 kilomètres de diamètre et furent produits par des corps de la taille d'astéroïdes de quelques kilomètres de diamètre qui percutèrent la Terre il y a près de deux milliards d'années ³⁶. Une collision de cette taille est une catastrophe majeure à tout point de vue. L'énergie dégagée lors d'un tel événement est d'environ 1 million de mégatonnes de TNT, équivalent à la totalité du flux thermique dégagé par la terre pendant un siècle ; et cette énergie est délivrée en quelques secondes en un seul point de la surface de la Terre.

Les connaissances accumulées à partir de l'étude des cratères de météorites terrestres pendant la décennie précédant l'alunissage d'Apollo 11 furent essentielles pour reconnaître et apprécier les effets des nombreux impacts de météorite sur la Lune. La découverte des **(page 155)** effets de déformation de choc dans les roches terrestres permit d'identifier des effets semblables dans le régolite et d'établir immédiatement le rôle des impacts de météorite dans sa formation. Si l'alunissage d'Apollo 11 s'était

36. Une autre manière d'illustrer cette grande probabilité que de tels impacts géants aient eu lieu dans le passé est de remarquer que de nombreux astéroïdes de taille respectable se sont rapprochés de la Terre (astronomiquement parlant) dans un passé récent. En 1937, Hermes passa à moins de 800 000 kilomètres, soit à peu près deux fois la distance de la Lune. En juin 1968, Icare passa à moins de 6 millions de kilomètres, son trajet la faisant passer devant le Soleil à l'intérieur de l'orbite de Mercure. Sur de longues périodes, des planètes comme la Terre ont tendance à attirer et à capturer de plus petits objets dont les orbites se trouvent proches d'elles. Il est possible que, dans quelques autres millions d'années (une courte période du point de vue géologique) Icare aura disparu et que la Terre aura un nouveau cratère d'impact de 50 kilomètres de diamètre.

réalisé ne serait-ce qu'une dizaine d'années plus tôt, nous n'aurions pas eu cette information et l'origine du régolite aurait été beaucoup plus difficile à comprendre.

Ces cratères météoritiques terrestres furent aussi utilisés comme lieu d'entraînement pour les astronautes. Pour avoir un aperçu d'une variété représentative de cratères, les différents équipages d'Apollo visitèrent le jeune et petit Meteor Crater en Arizona, le plus grand et plus ancien mais bien conservé cratère du Ries Kessel en Allemagne (25 kilomètres de diamètre et âgé de 15 millions d'années), et enfin l'ancien Bassin de Sudbury au Canada, profondément érodé.

D'une certaine manière, Sudbury constitua ma propre et petite contribution personnelle au Programme Apollo. Le bassin, d'environ 60 kilomètres de long sur 30 de large, se trouve au Nord de la ville de Sudbury, en Ontario, dans une région très importante de mines de nickel. Des études géologiques conduites en même temps que les activités minières avaient découvert de grandes étendues de roches brisées et déformées autour de la zone et en 1964 Robert S. Dietz suggéra que la structure et les roches brisées pouvaient être le résultat de l'impact d'une météorite géante. Sceptique mais curieux, je fis mon premier voyage à Sudbury en 1966 et découvris les effets très nets de déformation de choc conservés dans les roches. Confirmé comme étant un effet secondaire d'un impact à Sudbury, le site fut sélectionné pour l'entraînement des astronautes, et en 1971 et 1972 j'ai participé à des exercices sur le terrain avec les équipages d'Apollo 16 et Apollo 17. Le choix de Sudbury comme site d'entraînement fut particulièrement heureux pour l'équipage d'Apollo 16 qui vit de nombreuses brèches d'impact semblables pendant leur exploration sur Descartes.

Les impacts de météorite sont d'une aide particulière pour les géologues qui étudient la Lune parce qu'un seul impact peut répandre des fragments de roche à travers une vaste étendue. Un géologue peut donc récolter à partir d'un seul endroit une variété de fragments rocheux provenant de **(page 156)** différentes régions de la Lune, et un unique échantillon de régolite apporte plus d'informations que ce qui pourrait être obtenu par l'échantillonnage du socle rocheux du site lui-même.

De plus, un impact de météorite et notamment un petit, est un phénomène assez uniforme qui peut être reproduit en laboratoire et dont les effets peuvent être calculés mathématiquement. Des scientifiques peuvent estimer jusqu'où des fragments rocheux pourront être projetés en dehors d'un cratère donné et à partir de ces calculs, ils peuvent construire des modèles du mode de formation du régolite sous l'effet d'impacts continuels.

Autant les calculs que les analyses de laboratoire du régolite d'origine montrent que plus de 90% des fragments rocheux d'un échantillon donné de régolite ont été projetés en dehors de petits cratères de la région immédiate, si bien que le régolite représente un bon échantillon du socle rocheux local même si celui-ci est complètement recouvert. Le plus intéressant est que les mêmes calculs montrent que nombreux sont les fragments rocheux des dix autres pour cent à avoir été projetés en dehors de plus grands cratères situés à des dizaines voire des centaines de kilomètres de là. Le régolite de n'importe quel point contient un petit nombre de fragments rocheux provenant de loin, certains d'entre eux pouvant venir de la face cachée de la Lune. Par exemple, de petits fragments de roches riches en feldspath des « continents » lunaires furent trouvés dans les régolites de la « mer » d'Apollo 11 près de 3 ans avant le premier alunissage sur Descartes avec Apollo 16.

En plus de l'éparpillement de roches de tous côtés à travers la surface de la Lune, un impact de météorite pénètre à l'intérieur de la Lune et apporte à la surface du matériau enseveli en profondeur. En moyenne, la profondeur d'un cratère de météorite est environ le dixième de son diamètre. Un cratère de 200 mètres de diamètre seulement peut pénétrer à travers 20 mètres d'épaisseur de régolite et projeter des blocs de socle rocheux fraîchement arrachés sur la surface qui l'entoure. Un impact géant comme un de ceux qui ont formé les grands bassins de la Mer Orientale et de la Mer des Pluies peut avoir extrait des matériaux sur une profondeur de 50 kilomètres. L'échantillonnage soigneux autour des sites de tels impacts est la seule manière qu'avaient les astronautes (**page 157**) d'obtenir des échantillons venant de la profondeur de la Lune.

Les sites d'alunissage d'Apollo et les excursions lunaires des astronautes furent soigneusement planifiés afin de tirer profit de l'échantillonnage géologique des impacts de météorite. Grands et petits cratères d'impact jouèrent un rôle important dans le choix du site d'alunissage d'Apollo 14 sur Fra Mauro. Le site fut sélectionné dans l'espoir d'échantillonner du matériau éjecté de la profondeur de la Lune par l'impact géant qui forma la Mer des Pluies. Sur le site d'alunissage, les astronautes se concentrèrent sur l'exploration du Cratère Cône, un plus petit cratère de 340 mètres de diamètre qui avait « foré » la fine couche de régolite et avait projeté en dehors, des blocs frais de brèches sous-jacentes de la Formation Fra Mauro.

D'autres missions Apollo visitèrent de petits cratères de quelques centaines de mètres de large pour récolter des échantillons de socle rocheux sous le régolite. Le Cratère South Ray procura aux astronautes d'Apollo 16 des brèches de continents riches en plagioclase et le Cratère Shorty permit la découverte du « Sol Orange » par l'équipage d'Apollo 17.

Quel que fut l'endroit où les astronautes l'échantillonnèrent, le régolite contenait toujours quelques fragments rocheux « exotiques » qui donnèrent l'indication sur ce que la Lune pouvait être à des centaines de kilomètres de là ou à dix kilomètres de profondeur. Nous avons appris beaucoup plus sur la Lune du fait qu'elle a été bombardée depuis une éternité par des impacts de météorite que si toute la surface de la Lune avait été intacte, faite de roche compacte sans un grain de poussière la recouvrant.

JARDINAGE DANS LE RÉGOLITE

Le régolite commence à se former dès que toute roche « fraîche », telle qu'une nouvelle coulée de lave, est exposée pour la première fois à la surface de la Lune. (**page 158**) (Figure G). Le socle rocheux « frais » est immédiatement frappé par des particules cosmiques qui creusent de petits cratères sur la surface et cassent la roche originelle en fragments de plus en plus petits.

#####

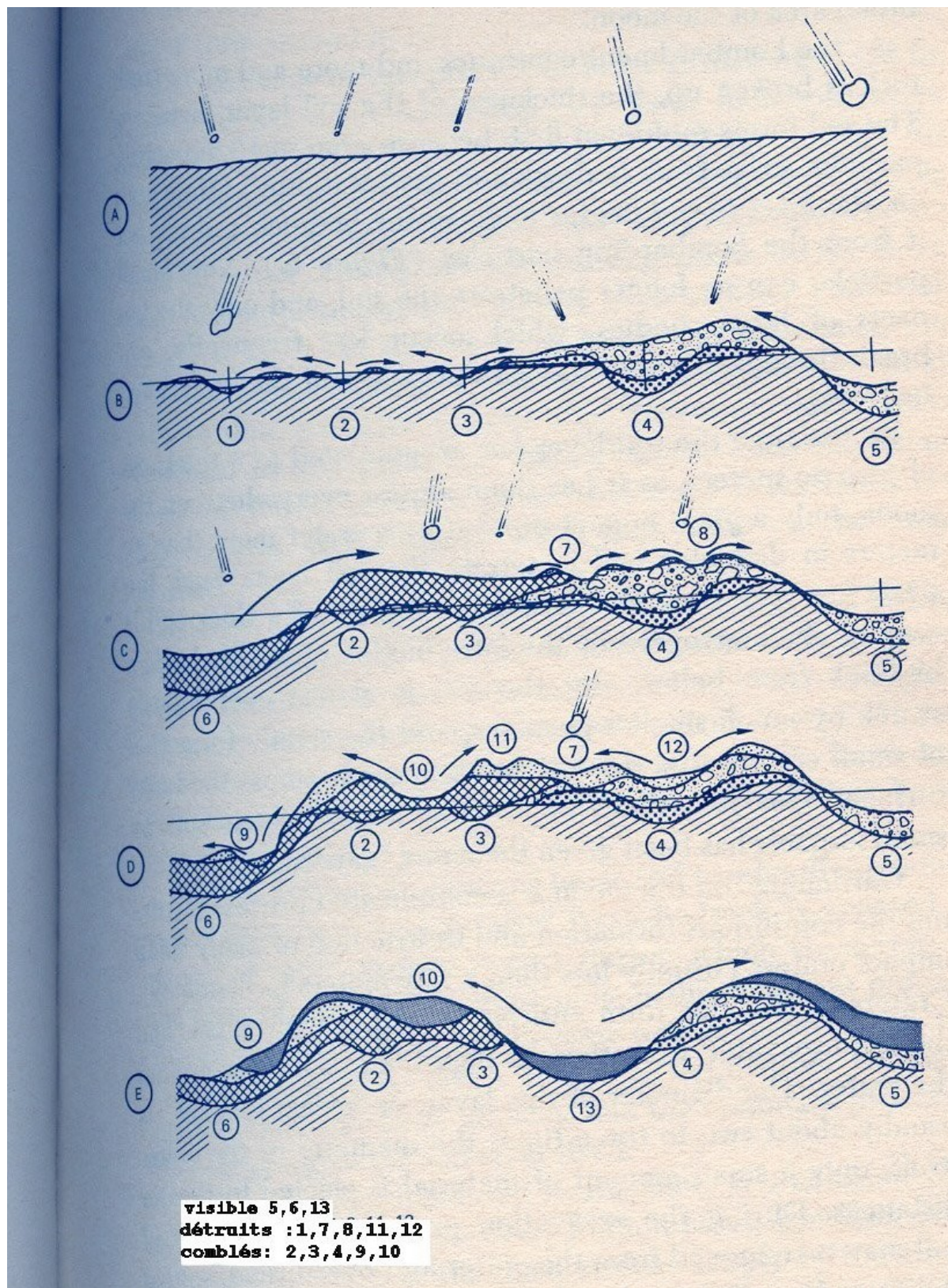


Figure G (page 158). La formation du régolite. Cette série de coupes montre le développement progressif de la couche de régolite, commençant là où le socle rocheux « neuf » (hachure oblique) est exposé au bombardement météoritique (A). A ce stade (B), à la fois de grands et petits cratères (1-5) creusent le socle rocheux et élèvent des couches de matériau éjecté (petits ovales) à l'intérieur et autour des cratères (Les flèches indiquent la direction du mouvement du matériau

éjecté au dessus et en dehors du cratère). Pendant que les couches de matériau éjecté se développent (C), de grands cratères (6) continuent à défoncer le socle rocheux, mais de plus petits (7,8) ne pénètrent pas la couche de débris et éjectent seulement du régolite remanié (petits points). Alors que l'épaisseur de la couche de régolite augmente (D), même des cratères profonds (9 - 12) ne réussissent pas à atteindre le socle rocheux, et (E) seulement un grand cratère inhabituel (13) pénètre assez profondément pour produire une couche de débris de socle rocheux fraîchement éjectés (pointillé fin). Ce stade final montre une partie du caractère compliqué du régolite qui est en fait constitué de nombreuses couches différentes et discontinues de matériau éjecté, dont certaines contiennent du socle rocheux frais et d'autres seulement du régolite remanié. Noter aussi la destruction de plus petits cratères par de plus grands pendant le processus de formation du régolite. Sur les 13 cratères, seuls trois (5, 6, 13) sont encore visibles à la surface. Cinq ont été détruits (1, 7, 8, 11, 12) et les cinq autres ont été comblés. (2, 3, 4, 9, 10).

Toute la gamme de tailles de cratères lunaires correspond à celles variables des particules impactantes. Les plus petits cratères, d'une fraction de millimètre de large, sont formés sur la surface des roches découvertes par de minuscules particules de poussière cosmique et par des micrométéorites. Les grands cratères, de quelques centimètres à des mètres de diamètre, sont formés par des particules moins communes de la taille de billes, de balles de golf ou de pamplemousse. Les plus grands cratères, de quelques kilomètres à des centaines de kilomètres de diamètre, montrent que les impacts de grandes météorites et d'astéroïdes sont extrêmement rares. Cette progression des diamètres des cratères, de moins d'un millimètre à des dizaines ou des centaines de kilomètres, est un des arguments les plus convaincants pour un impactisme météoritique continu sur la Lune.

Tous les impacts, grands et petits, contribuent à la formation du régolite. Les minuscules micrométéorites brisent de petites roches et creusent des trous sur les surfaces des plus grandes, alors que l'impact d'un astéroïde peut éparpiller (**page 160**) des débris cassés sur une large étendue de la Lune.

Alors que le bombardement continue et que de plus en plus de roche fraîche se trouve brisée, l'épaisseur du régolite augmente. Le régolite se forme d'abord rapidement, parce que même de petites particules impactantes frappent le socle rocheux « frais » et le brisent. Mais après un certain temps, le régolite commence à couvrir le socle rocheux et le protège du bombardement des particules. (Figure G). Dès lors de petites particules ne peuvent plus pénétrer le régolite et, seuls les impacts de plus grands corps, qui se produisent moins fréquemment, peuvent faire une brèche dans le régolite et font exploser des morceaux du socle rocheux sous-jacent.

Au fil du temps, la couche de régolite s'accumule sur une épaisseur de 5 à 20 mètres, comme cela s'est fait presque partout sur la Lune, et seul un impact géant creusant un cratère de plus de 50 mètres de diamètre pénétrera le régolite. De tels impacts sont très rares et le cours de l'évolution d'un régolite épais est rarement interrompu par l'apport de socle rocheux fraîchement brisé venu de la profondeur. Mais le régolite est presque continuellement percuté par de nombreuses plus petites particules, et la formation régulière de petits cratères remue le sol et l'éparpille sur la surface lunaire. Ce remaniement du régolite déjà formé par de petits impacts a reçu le nom de « jardinage ».

Le « jardinage » sur la Lune est un processus compliqué impliquant la formation continue et la destruction de nombreux petits cratères d'impact (habituellement de moins de quelques mètres de diamètre). Des cratères de cette taille se forment entièrement dans l'épaisseur du régolite et, le sol creusé à ses dépens est déposé en une couche autour du cratère. L'étendue de cette couche ou « couverture d'ejecta » est habituellement d'environ deux à trois fois le diamètre du cratère lui-même ; seule une petite quantité de matériau est éjectée à de plus grandes distances. Pendant le processus d'excavation, de grandes masses de régolite peuvent être déplacées en dehors du cratère et retournées, si bien qu'elles sont déposées sur la surface lunaire en désordre. Après la formation d'un petit cratère, il sera lentement enseveli et (**page 161**) rempli par de nouvelles couches de régolite projeté en dehors de cratères plus récents qui se forment autour de lui.

L'existence de ce processus de jardinage lunaire pouvait être prévu à partir de notre connaissance du bombardement par de petites météorites sur la Lune et à partir de nos observations montrant que la surface lunaire est littéralement saturée de petits cratères se chevauchant les uns sur les autres. Mais les échantillons lunaires ont apporté encore davantage de preuves que mouvement et bouleversement se produisent dans le régolite. Sans surprise, les faces exposées de certaines roches récoltées à la surface de la Lune montrent de nombreux et minuscules creux cernés de verre (microcratères) qui se sont formés sous l'effet d'impacts de petites particules de poussière cosmique (photo 26). Cependant, de nombreuses roches récoltées par les astronautes avaient aussi de semblables microcratères sur leur *face inférieure*, preuve que ces roches avaient été retournées au moins une fois depuis qu'elles étaient à la surface de la Lune.

Il y a aussi une preuve semblable concernant un mouvement et un malaxage à l'intérieur du régolite lui-même. Des échantillons récoltés plusieurs centimètres sous la surface contenaient des fragments de minéraux et des sphérules de verre également piquetés de microcratères (photo 27). A un moment, ces minuscules fragments ont dû se trouver sur la surface de la Lune assez longtemps pour être percutés par des particules de poussière avant d'être ensevelis dans le régolite.

La formation d'une couche de régolite peut être divisée en deux étapes. Immédiatement après l'exposition du socle rocheux frais, une période de croissance rapide se produit pendant laquelle la fracture du socle rocheux, plutôt que le « jardinage », est le processus dominant. Mais une fois que la couche de régolite a atteint plusieurs mètres d'épaisseur, le rythme de croissance diminue, le socle rocheux protégé est fracturé uniquement par de rares grands impacts, et le processus dominant est le « jardinage » de la couche de régolite.

Si le régolite augmentait d'épaisseur à un rythme constant, c'est à dire tant de millimètres par millions d'années, les scientifiques pourraient déterminer l'âge de la surface lunaire par simple mesure de l'épaisseur de la couche de régolite. Mais du fait que le régolite augmente rapidement dans un premier temps puis lentement, rend difficile cette mesure avec exactitude. (**page 162**). Néanmoins, l'origine du régolite expliquée par les impacts continus implique que les roches lunaires plus anciennes aient été recouvertes par une couche plus épaisse de régolite. Les mesures obtenues par les différentes missions Apollo ont montré que cette relation est généralement vraie. Le régolite des « continents », mesuré sur le site Descartes, a environ 10 mètres d'épaisseur, alors qu'il n'a que 5

mètres sur des « mers » plus jeunes. De semblables variations existent aussi d'un site de « mer » à l'autre. Sur le site d'Apollo 11, sur la Mer de la Tranquillité, là où le socle rocheux est âgé de 3,7 milliards d'années, l'épaisseur estimée du régolite est de 3 à 6 mètres. Mais sur le site d'alunissage d'Apollo 12, sur l'Océan des Tempêtes, là où les roches sont plus jeunes (3,3 milliards d'années), le régolite a une épaisseur moyenne moitié moindre, de 1 à 3 mètres, et des blocs de socle rocheux excavé dans des cratères de 3 mètres de profondeur seulement furent signalés par les astronautes. Une structure beaucoup plus jeune, Crater North Ray, près de Descartes, fut échantillonnée par les astronautes d'Apollo 16. Des études de roches éjectées du cratère montrèrent qu'il se forma il y a 50 millions d'années ; la couche de régolite qui recouvre ses roches exposées est de quelques centimètres seulement.

Bien que le plus ancien socle rocheux soit recouvert d'une couche de régolite plus épaisse, des tentatives pour calculer l'âge exact de la surface en se basant seulement sur les épaisseurs de régolite peuvent conduire à des réponses hasardeuses. Par exemple, la comparaison des épaisseurs de régolite pourrait conduire à la conclusion que les continents sont deux fois plus anciens que les mers, ce qui les rendrait plus anciens que le système solaire ! L'épaisseur de régolite peut même varier beaucoup sur le même lieu. Sur le site d'Apollo 15, près du sillon Hadley, où des roches vieilles de 3,3 milliards d'années furent trouvées, le régolite variait de 1 à 5 mètres d'épaisseur. Sur le site d'Apollo 17, la couche de régolite fut modifiée par des groupes de cratères de taille modérée et par des matériaux de surface d'aspect poudreux qui auraient pu glisser dans la Vallée Littrow à partir des collines environnantes ; suivant les endroits, les épaisseurs de régolite variaient de 2 à 39 mètres.

(page 163) La variation de la quantité de régolite sur la surface lunaire est une preuve supplémentaire que la formation de régolite est un processus incroyablement lent. Par exemple, 5 mètres de régolite seulement se sont formés sur le site d'Apollo 11 depuis que la lave s'est solidifiée là il y a 3,7 milliards d'années. Ceci représente un rythme moyen de 1,5 millimètre de régolite par million d'années, faisant de la formation du régolite lunaire la processus géologique le plus lent jamais mesuré. Le lent dépôt de sédiment dans les bassins océaniques profonds produit environ un millimètre de boue fine par millier d'années et donc se produit mille fois plus vite.

La structure interne du régolite est importante car elle apporte des informations sur les détails du processus de « jardinage ». Les nombreux impacts de petits corps, ceux-là même qui forment des cratères de quelques centimètres de diamètre, produisent un perpétuel mouvement et un mélange des premiers centimètres du régolite. Au contraire, les plus grands impacts plus rares, même s'ils ne pénètrent pas le régolite, extraient une grande quantité de matériau et la déposent sous forme d'une couche spécifique sur une étendue relativement grande autour du cratère. Au fil du temps, de plus grands impacts forment une série de couches de matériau éjecté, une couche pour chaque impact, alors que les plus petits impacts en plus grand nombre tendent à mélanger ensemble toutes les couches. Que le régolite soit bien mélangé ou stratifié dans son épaisseur dépend du processus le plus rapide : la destruction d'anciennes couches par de petits impacts, ou le dépôt de nouvelles couches causée par de plus grands impacts.

A partir d'une coupe de régolite, les scientifiques peuvent déterminer s'il est bien mélangé ou

stratifié en profondeur, et puis calculer les rythmes auxquels, aussi bien de grandes que de petites particules percutèrent la Lune dans le passé. Ils peuvent comparer ces calculs avec les rythmes d'impacts actuels pour voir si le bombardement de la Lune a changé avec le temps. De plus, si la stratification était encore conservée dans le régolite, il pouvait être possible d'identifier la couche associée à un cratère spécifique et (**page 164**) donc déterminer quand le cratère s'était formé et quelle sorte de roche il avait éjecté.

Ces coupes de régolite furent récoltées en enfonçant un tube de métal verticalement dans le régolite. Quand le tube était retiré, il contenait une carotte de régolite de 2 centimètres de diamètre et habituellement de 10 à 20 centimètres de long.

Les premières carottes rapportées par la mission Apollo 11 avaient 10 centimètres et 13,5 centimètres de long. Elles semblaient bien malaxées et homogènes, suggérant que le processus de malaxage était efficace au moins à ces profondeurs. Mais les deux carottes d'Apollo 12 prouvaient une histoire très différente. Elles avaient pénétré à des profondeurs de 19,3 et 41,3 centimètres, et la carotte la plus longue contenait au moins dix couches distinctes avec des couleurs, des tailles de particules et des compositions différentes. La plupart de ces couches étaient faites de matériau reconnu comme du régolite remanié, mais quelques unes contenaient des particules grossières de socle rocheux, suggérant que ces couches étaient la marque de plus grands impacts qui avaient formé un cratère suffisamment grand (peut être de 25 mètres de large) pour pénétrer à travers le régolite du site d'Apollo 12. Une couche particulière, de couleur gris clair et riche en silice, a été identifiée comme étant du matériau éjecté du cratère Copernic, de 75 kilomètres de diamètre et situé à environ 400 kilomètres de là.

Une stratification encore plus remarquable fut trouvée dans la longue carotte (242 centimètres) rapportée du site d'alunissage d'Apollo 15 sur Hadley Rille. Cette carotte contenait au moins 42 couches différentes variant en épaisseur de quelques millimètres à 13 centimètres. Des carottes bien stratifiées furent aussi rapportées par l'équipage d'Apollo 16 à partir des « continents » proches de Descartes.

Les carottes issues des dernières missions Apollo démontrent que la stratification est conservée dans le régolite et que son mélange par de petits impacts ne se produit pas rapidement aux profondeurs supérieures à quelques centimètres³⁷. Cette conclusion concorde (**page 165**) avec l'évaluation de l'importance du malaxage du « sol » elle-même basée sur notre connaissance du rythme auquel les petites particules heurtent la Lune. Les calculs montrent que le premier demi millimètre de régolite aurait été retourné plus de 100 fois par million d'années et aurait donc été probablement mélangé. Mais la vitesse de mobilité décroît radicalement lorsqu'on s'enfonce même

37. L'homogénéité apparente de la carotte d'Apollo 11 peut être due à différentes causes. La carotte pouvait avoir été récoltée par hasard dans une zone qui avait été bien malaxée par un impact de grande taille et méconnu. Ou bien, le régolite épais du site d'Apollo 11 peut avoir été assez uniforme pour qu'il n'y ait pas eu de différences de couleur ou de structure permettant de reconnaître une stratification pourtant présente. Enfin, la stratification pouvait avoir été détruite pendant la récolte, le transport ou le traitement de la carotte elle-même. Quelque soit la raison, l'échantillon de carottage d'Apollo 11 ne semble pas typique du régolite d'autres parties de la Lune.

très peu dans le régolite. Au contraire, le premier centimètre de régolite est remué une fois tous les 10 millions d'années seulement, et, remuer le régolite à des profondeurs de plusieurs centimètres ou mètres, demande des milliards d'années.

La lenteur et la nature superficielle de l'érosion lunaire et du malaxage du sol ont été démontrées de façon spectaculaire par les études de la longue carotte rapportée par la mission Apollo 15 à partir du Sillon Hadley. La mesure des seuls effets chimiques produits sur l'échantillon carotté par les rayons cosmiques a montré que l'ensemble des couches contenu dans les 242 centimètres de profondeur de la carotte est resté inchangé sur la surface lunaire depuis environ 500 millions d'années. Les données suggèrent que les couches font partie d'une masse de régolite qui fut éjectée d'un grand cratère d'impact et déposée sur la surface lunaire d'un seul coup il y a 500 millions d'années. L'altération de la Lune a été si lente depuis lors que les couches ont été conservées bien qu'elles reposent sur la surface lunaire depuis un laps de temps équivalent à toute la période de la vie fossilisée sur la Terre.

A la fin du Programme Apollo, nous comprenions mieux certains aspects de la nature et de l'origine du régolite que ceux des sols de la Terre. Le caractère étrange du régolite provient de ce qu'il s'est formé sous l'effet du bombardement régulier, continu de la surface lunaire par des météorites et il n'a subi aucun des effets imprévisibles du vent, de l'eau et de la vie qui compliquent les sols de notre planète. **(page 166)**

De plus, tout le régolite formé depuis toujours sur la Lune est encore là sur la surface plus ou moins inchangé. Sur une épaisseur de seulement quelques mètres, le régolite conserve entièrement la trace de milliards d'années de la lente évolution de la Lune. Nulle part sur Terre, nous ne pouvons trouver de gisements qui concentrent autant de temps dans une couche aussi mince. Le carottage profond d'Apollo 15 rapporta une séquence de l'histoire lunaire restée inchangée pendant un demi milliard d'années. Les cinq mètres d'épaisseur de régolite sur la Mer de la Tranquillité contiennent l'information sur les 3,7 derniers milliards d'années. Et les régolites plus épais des « continents » lunaires peuvent garder la trace de l'histoire de la Lune depuis des temps encore plus reculés.

Le régolite représente plus que les simples débris remaniés et éparpillés des roches compactes de la Lune. C'est la couche frontière entre la Lune et l'Espace et en son sein, l'histoire de la Lune est mêlée à l'histoire d'autre matière et d'autre énergie du système solaire. Le régolite garde la trace du bombardement de la Lune par des particules solides de toutes tailles ; il contient les traces du passage de rayons cosmiques à haute énergie ; et il est saturé d'atomes du vent solaire qui s'est répandu à partir du Soleil depuis des milliards d'années. Même si rien ne vit dans le régolite, nous moissonnerons un jour une récolte de grande valeur grâce à lui, une abondance de connaissance sur notre Univers.

CHAPITRE 8

DU TEMPS ET DE LA LUNE

Le temps et la Lune ont toujours eu des rapports étroits dans l'esprit de l'Homme. La Lune a été notre chronomètre ; ses passages réguliers dans le ciel nous ont donné les mois et les saisons avec lesquels nous mesurons nos propres brèves vies. Encore comme un chronomètre, la Lune a aussi semblé éternelle. Elle existe avec la Terre depuis une éternité avant l'apparition de l'Homme – les preuves des marées causées par la Lune se retrouvent dans des roches ensevelies sous les océans depuis plus de trois milliards d'années.

Quand les hommes commencèrent à observer la Lune de plus près, ils remarquèrent qu'elle paraît même vieille. Sa surface meurtrie et fortement cratérisée semble conserver des traces de catastrophes originelles dont il ne reste rien à la surface de la Terre.

La capacité relativement nouvelle de l'homme à mesurer les âges réels des roches est probablement son outil le plus important pour comprendre l'histoire de sa propre planète et de la Lune. Ces techniques de datation dépendent de certains éléments radioactifs contenus dans les roches, éléments qui se transforment en nouvelles (**page 168**) substances à un rythme régulier depuis des millions voire des milliards d'années.

COMMENT LES ROCHES RACONTENT-ELLES LE TEMPS ?

Seul un demi-siècle s'est écoulé entre la découverte de la radioactivité et son application comme méthode de routine pour la datation des roches et des minéraux. Juste avant 1900, Henri Becquerel (1852-1908) et Marie (1867-1934) et Pierre Curie (1859-1908) découvrirent que certains atomes, comme ceux de l'uranium et du thorium, étaient instables et se transformaient progressivement en atomes plus légers en émettant de petites particules atomiques. La transformation de l'atome « parent » d'origine en un nouvel atome ou « fils » se produit à un rythme constant, et chaque désintégration dégage une petite quantité de chaleur. Pour de nombreux éléments radioactifs, ce rythme est si lent qu'il faudrait des milliards d'années pour que tout l'élément « parent » se transforme (se désintègre est le terme technique) en l'élément fils.

Cette découverte produisit un bouleversement immédiat et brutal dans nos idées sur l'âge de la Terre. Au moment de la découverte de la radioactivité, l'âge de la Terre était le sujet d'un âpre débat entre géologues et physiciens. Des géologues, qui mesuraient le rythme de la sédimentation au fond des océans, soutenaient qu'il fallait au moins plusieurs centaines de millions d'années (et peut-être un ou deux milliards d'années) pour accumuler toutes les couches épaisses de roches sédimentaires maintenant mises à jour sur les continents. Les physiciens, parmi lesquels Lord Kelvin (1824-1907) fut le plus éminent, estimaient à partir du rythme avec lequel la Terre perdait de la chaleur, que la

Terre ne pouvait pas être âgée de plus de 100 millions d'années (et peut-être pas plus de 25 millions), même si la Terre avait été complètement fondue au moment de sa formation.

La découverte de la radioactivité des roches régla la controverse en faveur des géologues et d'une Terre plus âgée. Tout d'abord, **(page 169)** la radioactivité de l'intérieur de la Terre était une source significative de chaleur qui, de façon compréhensible, n'était pas prise en compte dans les calculs de Lord Kelvin. Dès lors la Terre pouvait perdre de la chaleur à son rythme actuel et néanmoins être âgée de plusieurs milliards d'années. Plus important, la radioactivité offrait des techniques permettant de prouver que des roches vieilles de plusieurs milliards d'années existaient réellement sur la Terre.

Peu après la découverte de la radioactivité, les scientifiques démontrèrent que l'élément uranium se désintégrait en plomb à un rythme régulier. Donc, tout minéral contenant de l'uranium devrait progressivement se charger en plomb et la quantité de plomb produite dépendrait de la quantité d'uranium présente et de l'âge du minéral. En 1907, B. B. Boltwood (1870-1927) data certaines roches anciennes de 1 à 2,5 milliards d'années en mesurant la quantité de plomb dans les minéraux riches en uranium. Plus tard des scientifiques améliorèrent les méthodes de Boltwood mais ses résultats initiaux restèrent inchangés, et progressivement les scientifiques acceptèrent l'idée que la Terre existait depuis des milliards d'années.

Résultat du progrès dans plusieurs domaines différents, la datation des roches devint une méthode de routine et encore plus précise pendant le demi-siècle suivant. Les physiciens apprirent beaucoup de choses sur les processus de la désintégration radioactive. Des instruments de meilleure qualité et plus sensibles furent construits pour ces mesures. Et des géologues, prenant lentement conscience du potentiel de ce nouvel outil, commencèrent à chercher consciencieusement et avec succès des roches encore plus anciennes.

En 1950, plusieurs éléments radioactifs naturels pouvant être utilisés pour la datation des roches furent découverts. Dans certains cas ces atomes sont deux isotopes³⁸ naturels des mêmes éléments, **(page 170)** tels que l'uranium 235 (qui se désintègre en plomb 207) et l'uranium 238 (qui se désintègre en plomb 206). Un autre atome, le thorium 232, se désintègre en plomb 208. D'autres parents utilisés pour la datation sont des isotopes radioactifs qui se présentent comme une petite fraction d'un élément non radioactif. Par exemple, le potassium n'est pas considéré comme un élément radioactif, mais il contient une petite quantité d'un isotope, le potassium 40, qui se désintègre en un gaz, l'argon 40, suffisamment lentement pour être utilisable dans la datation des roches. Le rubidium 87, qui se désintègre en strontium 87 est également utilisé.

38. Les isotopes sont des atomes du même élément qui ont différents poids atomiques. Les propriétés chimiques qui caractérisent un élément dépendent du nombre de particules atomiques positives (protons) et de particules négatives (électrons) dans l'atome. Comme les charges négatives et positives doivent s'équilibrer, les nombres d'électrons et de protons doivent être égaux et ce nombre (appelé le nombre atomique) caractérise l'élément. Mais un atome peut aussi contenir des particules neutres (neutrons) dont le nombre peut varier légèrement. La somme des protons et des neutrons donne le poids atomique qui est utilisé pour désigner différents isotopes d'un élément. A cause de leur importance dans les réactions nucléaires, les isotopes de l'uranium sont devenus bien connus. Les deux isotopes ont 92 protons mais l'un contient 143 neutrons (uranium 235) alors que l'autre en contient 146 (uranium 238).

Comme la précision des méthodes de datation s'améliora pendant les deux décades précédant le Programme Apollo, les scientifiques purent établir les limites fondamentales entre l'âge de la Terre et de l'Univers. Des mesures sur des météorites donnèrent des âges d'environ 4,6 milliards d'années, et ce chiffre est généralement accepté pour l'âge de la Terre et du reste du système solaire. Des roches d'Afrique du Sud ayant des âges de 3,3 à 3,5 milliards d'années furent considérées comme étant les plus vieilles roches conservées sur Terre jusqu'à ce que des roches de 3,8 milliards d'années soient découvertes au Groenland il y a quelques années. Cinquante ans après Lord Kelvin, l'âge reconnu de la Terre augmenta du centuple jusqu'à un temps si grand qu'il est difficile à imaginer. Si l'âge de la Terre était considéré comme étant d'un seul jour, l'existence de toute la vie fossilifère couvrirait seulement 3 heures et toute l'histoire de l'humanité serait contenue dans la dernière seconde.

Un problème majeur lors de la réalisation des datations est que les éléments parent et fils ne se présentent habituellement que sous la forme de quelques fractions par million (une fraction par million = 0,0001 pour cent) dans la plupart des roches et minéraux. La radioactivité des éléments parents n'est pas dangereuse et ne peut, en fait, être détectée que (**page 171**) par des instruments sensibles. L'analyse des éléments parent et fils demande des machines compliquées appelés spectromètres de masse, qui utilisent des aimants puissants pour isoler et mesurer les différents isotopes d'un même élément. Quelquefois les quantités des éléments « parent » et « fils » sont si petites que les analyses doivent être faites dans des « chambres propres » spécialement aménagées faites pour se protéger de la poussière atmosphérique et pour réduire le risque de contamination. Dans ces conditions il devient possible de mesurer les isotopes dans un milliardième de gramme de matériau. Des scientifiques ont mesuré les âges de roches lunaires qui pesaient moins de quelques milligrammes et équivalent en taille à une fraction d'un banal comprimé d'aspirine.

Bien que la technologie de la datation soit complexe, ses principes sont simples et les mêmes lois physiques s'appliquent à la désintégration radioactive aussi bien sur Terre que sur la Lune. Quand une roche se forme, les atomes parents radioactifs sont piégés dans différents cristaux dans lesquels ils commencent à se désintégrer en leurs atomes fils. Chaque cristal se comporte dans la roche comme un sablier dans lequel le sable tombe du haut (parent) vers le bas (fils) à un rythme connu. Le temps peut être déterminé en voyant quelle quantité de sable s'est entassé au fond du sablier, ou en mesurant quelle quantité d'élément fils s'est accumulée dans le cristal.

Pour mesurer les âges réels des roches et des minéraux, on doit mesurer d'abord le rythme auquel un échantillon d'élément parent radioactif se désintègre en élément fils. L'âge de la roche peut être calculé à partir des quantités relatives d'éléments parent et fils qu'elle contient. Plus une roche est ancienne, plus il y aura d'élément fils présent. Les quantités d'éléments parent et fils, rapportées au rythme de désintégration du parent radioactif, donne une idée de l'âge de la roche.

Définir la « formation » d'une roche n'est pas aussi évident que cela puisse paraître car les horloges radioactives sont fortement influencées par la température. A des températures élevées (500 à 1000 °C), les éléments parents radioactifs peuvent migrer (**page 172**) librement à travers une roche, et le mélange au hasard des éléments parent et fils empêche l'utilisation de modèles pour la mesure du temps écoulé. Tant que les éléments radioactifs parents sont concernés, la « formation » correspond

vraiment au refroidissement de la roche jusqu'au point où ces éléments ne peuvent plus se mouvoir librement dans celle-ci et sont piégés dans les cristaux. Une coulée de lave fraîchement fondue, ou une masse de roche plus ancienne fondue et chauffée par un impact de météorite, ne commenceront pas à enregistrer la mesure du temps tant qu'elles n'auront pas été refroidies en dessous de 500 °C environ. Heureusement de telles roches refroidissent normalement assez vite et donc « l'âge de formation » enregistré grâce aux horloges radioactives ne sera pas très différent du moment d'éruption de la lave ou de la chute de la météorite.

Certaines autres conditions doivent être réunies dans la nature pour que les mesures apportent des âges cohérents. Tout d'abord, l'échantillon doit s'être formé à un moment unique dans le temps afin qu'il ait un âge significatif. Cela signifie que la roche aura dû être chauffée et refroidie en un laps de temps très bref. Des « âges » déterminés sur un mélange compliqué tel qu'une brèche lunaire ou un matériau constamment remanié comme le régolite ne reflètent pas un moment unique de formation.

Une autre complication apparaît lorsque la roche contient déjà un peu d'élément fils au moment de sa formation ; dans ce cas, les mesures feront apparaître la roche plus vieille qu'elle n'est en réalité. D'autres problèmes surgissent si certains changements chimiques se produisent dans la roche après sa formation. Si certains processus ajoutent plus d'élément parent ou déplacent l'élément fils, alors la roche apparaîtra trop jeune. Inversement, si de l'élément parent est déplacé et de l'élément fils ajouté, la roche apparaîtra trop vieille. Enfin, si quelque processus chauffe ou altère la roche légèrement, de telle sorte que les éléments parent et fils puissent passer de leurs sites originels vers d'autres localisations dans la roche, les résultats peuvent devenir très difficiles à interpréter.

Toutes ces difficultés ont été prises en compte dans les tentatives de datation des roches terrestres, spécialement dans les conditions géologiques (**page 173**) où l'eau est susceptible d'altérer la roche ou de favoriser la dispersion des éléments. Les géologues ont mis au point des moyens pour corriger ces effets et pour obtenir l'âge réel de la roche malgré tout. Une des meilleures méthodes est de mesurer plusieurs paires différentes d'élément parent-fils dans la même roche et de calculer l'âge particulier de chacune d'elles. Si tous les âges sont les mêmes, il est alors vraisemblable qu'ils représentent le temps réel de la formation de la roche.

Ces analyses peuvent actuellement être utilisées pour mesurer deux sortes différentes d'âges d'une roche : « l'âge de formation » qui donne le temps depuis lequel la roche s'est refroidie et les atomes radioactifs piégés, et une seconde sorte d'âge appelé « âge modèle ». L'âge modèle est déterminé par l'ensemble des échantillons chimiques présents dans la roche entière plutôt que dans les cristaux pris individuellement. Au lieu de donner le temps de formation de la roche dans son état actuel, un âge modèle fournit des indications sur les événements plus anciens ; il peut, par exemple, indiquer l'âge du matériau à partir duquel la roche s'est formée.

Pour illustrer la différence entre âges modèles et âges de formation, imaginez que vous preniez un morceau de granit dont l'âge de formation est évalué à 2 milliards d'années et que vous le réduisiez en poudre. La poudre que vous venez de fabriquer a un âge de formation égal à zéro. Mais comme les échantillons chimiques restent les mêmes dans la poudre, tels qu'ils étaient dans la roche originelle, les mesures sur la poudre donneront le même âge modèle de 2 milliards d'années. Si vous fondez la

poudre dans un four, le verre qui en résulte aura aussi un âge de formation de zéro alors que son âge modèle reste de 2 milliards d'années.

De nombreuses roches ont des âges de formation relativement jeunes et des âges modèle beaucoup plus anciens. Les deux sortes d'âges apportent une information importante sur l'origine et l'histoire de la roche. Dans le cas de laves à âges de formation jeunes, un plus ancien âge modèle peut être hérité de la roche originelle qui fut fondue pour produire la lave. Les laves d'Apollo 11, par exemple, ont des âges de formation de 3,7 milliards d'années, mais leurs âges modèles sont supérieurs à 4 milliards d'années. Ceci suggère que le matériau lunaire (**page 174**) de plus de 4 milliards d'années d'ancienneté fut fondu pour produire les laves il y a 3,7 milliards d'années.

La fusion complète d'une roche, qui pourrait succéder à un grand impact de météorite, mélangerait complètement les atomes parent et fils et effacerait tous les âges de formation originels. Quand la roche fondue se refroidirait, elle créerait un nouvel âge de formation qui daterait le moment de l'impact. Cependant, malgré la fusion, les impactites nouvellement formées conserveraient encore une somme d'information sur la nature et l'âge de la roche originelle percutée par la météorite.

ÂGES DES ROCHES LUNAIRES

Les mers

Ce fut une chance pour nous que les premiers échantillons rapportés de la Lune fussent bien de simples laves provenant de « mers ». Les roches s'étaient formées pendant une période unique de refroidissement de lave fondue, et l'examen microscopique des roches ne détectèrent aucun signe d'altérations indiquant que les horloges radioactives avaient été perturbées par des événements plus récents. Les âges furent facilement mesurés. Différentes combinaisons parent-fils (notamment les paires rubidium-strontium et potassium-argon) donnèrent les mêmes résultats. De plus, différents spécimens récoltés sur le même site avaient enregistré les mêmes âges. Peu de roches terrestres n'ont jamais été aussi faciles à analyser que les laves de la Mer de la Tranquillité. Les âges de 3,7 à 3,8 milliards d'années furent reconnus comme étant le moment de l'éruption et du refroidissement des coulées de lave basaltique ³⁹.

(**page 175**) Les âges de tous les basaltes de « mer » sont semblables et se trouvent dans une fourchette étroite entre 3,2 et 3,8 milliards d'années. Les basaltes de la Mer de la Tranquillité (Apollo 11) et de la Vallée Littrow (Apollo 17) sont les plus anciennes avec 3,7 à 3,8 milliards d'années, soit environ le même âge que les roches terrestres les plus anciennes qui ont été préservées, alors que celles de l'Océan des Tempêtes (Apollo 12) et du Sillon Hadley (Apollo 15) sont plus jeunes soit 3,2 à 3,4 milliards d'années. La lave de la Mer de la Fécondité, échantillonnée par la sonde automatique

39. Des échantillons d'un unique site lunaire montrent un éventail d'âge d'environ 0,1 à 0,2 milliard d'années pour des endroits situés sur la « mer » et l'éventail est encore plus large sur les « continents ». Une partie de cette dispersion est due à l'incertitude expérimentale de chaque mesure. Cette incertitude provient du fait qu'aucune des mesures faites en laboratoire ne peut avoir une précision absolue. Il en résulte que tout âge indiqué pouvait l'être avec une erreur de 3 à 5 pour cent, ce qui, pour une roche de 4 milliards d'années, représente 0,1 à 0,2 milliard d'années. Pourtant, une partie de la dispersion, notamment pour les roches de « continents », reflète probablement des temps de formation d'échantillons particuliers légèrement différents.

russe Luna 16, a un âge intermédiaire (3, 4 milliards d'années). Donc le schéma qui en résulte indique une longue période d'inondation de la Lune par la lave pendant environ un demi milliard d'années, suivie par une apparente fin d'activité volcanique depuis 3,2 milliards d'années.

Les analyses soigneuses nécessitées pour ces mesures apportèrent certaines informations chimiques importantes sur la Lune. Les combinaisons d'éléments radioactifs parent et fils dans les roches lunaires diffèrent beaucoup de celles des roches terrestres. En particulier, les rapports des différents isotopes de plomb sont totalement dissemblables, ce qui suggère que la Lune et la Terre ont été des planètes complètement séparées depuis leur formation. Le plomb dans les roches terrestres contient un isotope (plomb 204) qui ne se forme pas par désintégration radioactive. La présence de cet isotope indique que la Terre contenait une quantité significative de plomb originel au moment de sa formation. Le plomb dans les roches lunaires est totalement différent. Il ne contient presque pas de plomb 204 ; son plomb est presque complètement constitué d'isotopes dérivés de la désintégration d'uranium et de thorium.

Ceci montre que la Lune n'avait pratiquement pas de plomb au moment de sa formation. Les roches lunaires montrent aussi un contenu semblable et faible en rubidium. Rubidium et plomb sont tout deux des éléments volatils facilement perdus sous l'effet de la chaleur, et leur absence dans les roches lunaires était une preuve de plus que le matériau lunaire a été soumis à une chaleur intense pendant laquelle rubidium et plomb, ainsi (**page 176**) que des substances plus banales comme le sodium, le potassium et l'eau, furent vaporisés et perdus, peut être même avant la formation de la Lune.

Le régolite

Les scientifiques firent sur le régolite les mêmes analyses que celles faites sur les roches. Ils ne s'attendaient pas à déterminer un âge de formation du régolite, car celui-ci a une composition disparate complexe se formant et se mélangeant continuellement, et son histoire pourrait ne pas comporter un événement unique auquel attribuer un âge de formation. Au lieu de cela, on pouvait s'attendre à ce que les analyses de régolite apportent des données chimiques pouvant expliquer les processus de sa formation et les âges des différents matériaux qu'il contient.

Les résultats furent tout à fait inattendus. Des échantillons de régolite ont des âges modèles de 4,4 à 4,6 milliards d'années, donc plus anciens de un demi milliard d'années que les roches situées en dessous. Quels que furent le lieu de récolte du régolite et le nombre d'échantillons analysés, le même résultat d'environ 4 milliards et demi d'années fut retrouvé.

Cette découverte provoqua de nombreuses discussions parmi les scientifiques impliqués dans ces travaux d'analyse. Si le régolite se forme continuellement à partir d'une variété de matériaux différents, comment peut-il avoir un âge modèle unique et comment admettre que seul le même âge modèle se retrouve en de nombreux endroits différents de la Lune ? Et si le régolite se forme essentiellement par le broyage du socle rocheux local, comment peut-il apparaître plus ancien que les roches à partir desquelles il s'est formé ? Finalement, était-ce une simple coïncidence que les âges modèles du régolite fussent les mêmes que les âges mesurés sur les météorites, qui datent aussi de la formation du système solaire ? Il apparaissait là un sérieux hiatus quelque part dans notre connaissance.

Ce que ces résultats étranges suggéraient était qu'il y avait autre chose dans le régolite que seulement du socle rocheux local broyé. Certain facteur inconnu était à l'origine des âges modèles élevés. **(page 177)** Désirant un terme plus approprié, les scientifiques l'appelèrent le « composant magique » et se mirent à le rechercher.

Un tri et un examen soigneux des échantillons lunaires fournirent un certain nombre de fragments rocheux insolites mélangés aux morceaux de socle rocheux local qui représentaient 90% du régolite. Certaines de ces roches exotiques étaient des gabbros riches en plagioclase et des anorthosites des continents lunaires ; leur composition chimique ne pouvait pas expliquer les âges modèles élevés que les scientifiques essayaient de justifier. D'autres fragments insolites furent trouvés dans le régolite, principalement de minuscules éléments de roche écrasée et broyée et du verre étrange jaune brun (photo 28). Ces fragments furent reconnus pour la première fois dans les échantillons de régolite d'Apollo 12 et des morceaux encore plus grands des mêmes matériaux furent trouvés dans les brèches rapportées par les astronautes d'Apollo 14 à partir de Fra Mauro.

Ces roches exotiques ressemblent grandement aux basaltes des « mers », et, comme eux, sont composés principalement des minéraux plagioclase et pyroxène. Mais ils contenaient plusieurs fois autant d'éléments parents radioactifs rubidium, uranium et thorium que, les basaltes de « mer » ou n'importe quelles roches récoltées sur les « continents » lunaires (à la seule exception de la brèche étrange 12013 ; voir p. **139**). De plus, les âges modèles déterminés pour ces petits fragments furent les mêmes que ceux du régolite lui-même, environ 4,4 à 4,6 milliards d'années.

La composition de ces roches était de toute manière étrange. En plus de la présence d'une plus grande quantité d'uranium et de thorium que dans les autres roches lunaires, elles contenaient aussi de plus grandes quantités de potassium (K), d'un groupe de métaux connus sous le nom de terres rares (R E E), et de phosphore (P). Ces lettres furent associées pour appeler ces roches étranges, matériau « KREEP » ou basaltes à KREEP. (Elles sont aussi connues comme « basaltes Fra Mauro » après l'alunissage d'Apollo 14 où elles furent récoltées en quantité).

Le matériau KREEP ne peut pas être trop répandu sur la Lune. S'il constituait un grand volume de l'intérieur de la Lune, sa radioactivité élevée fournirait suffisamment de chaleur pour maintenir l'intérieur lunaire complètement fondu, et la Lune aurait à ce jour des éruptions de laves. **(page 178)** A partir de ce que nous avons appris des alunissages d'Apollo et des analyses faites à partir de l'orbite lunaire, il semble que la plus grande partie du matériau KREEP se trouve autour de la Mer des Pluies et peut-être dans une ou deux autres régions où il provoque les « points chauds » radioactifs détectés à partir de l'orbite. (voir page 114). (Les analyses orbitales révélèrent que le reste de la surface lunaire a une beaucoup plus faible radioactivité qui est caractéristique de roches telles que les basaltes de « mer » et les anorthosites « continentales »). Le matériau KREEP se situe probablement à des profondeurs de 25 à 100 kilomètres sous Mare Imbrium, et fut soufflé et répandu à travers la Lune par l'impact qui forma le Bassin Imbrium. Le KREEP est assez commun dans la formation Fra Mauro (qui est composée de matériau projeté en dehors de Mare Imbrium), et il se trouve aussi dans le régolite des sites d'Apollo 15 et 17, tous deux se trouvant assez rapprochés de Mare Imbrium pour avoir été atteints par le matériau éjecté. La radioactivité élevée fait du matériau KREEP une

importante source de chaleur ; il peut être en partie responsable des flux thermiques élevés mesurés sur les sites d'Apollo 15 et 17. Si une grande quantité de matériau KREEP se trouve sous la Mer des Pluies, cela peut avoir généré assez de chaleur pour jouer un rôle majeur dans la production de laves lunaires il y a 3,5 milliards d'années.

Une étude ultérieure du matériau KREEP montre que c'est le « composé magique » qui fait que les régolites semblent vieux. Sur la plupart des sites, il représente moins de 10% du régolite, essentiellement sous forme de matériau si fin qu'il est difficile de le reconnaître par l'examen microscopique. Mais le matériau KREEP est si riche en éléments parents radioactifs qu'il impose au régolite son propre âge modèle, exactement comme une petite quantité de peinture noire peut transformer une grande quantité de peinture blanche en une teinte gris sombre.

La découverte du matériau KREEP vint à l'appui des idées initiales des scientifiques sur le régolite. Les « mers » lunaires n'étaient pas plus anciennes que 3,8 milliards d'années et les scientifiques étaient certains que le régolite formé à leur surface était encore plus jeune. Mais les âges modèles anciens (**page 179**) du matériau KREEP suggéraient que quelque part sur la Lune il y avait des roches qui gardaient la trace d'événements lunaires de plus de 4 milliards d'années et pouvaient même remonter au delà de la formation de la Lune. Si de telles roches existaient encore, elles devraient être sur les continents lunaires.

Les continents

Bien avant l'alunissage d'Apollo 11, la cartographie au télescope de la Lune avait établi que les continents étaient plus anciens que les « mers ». Les échantillons d'Apollo 11 datèrent la formation de la Mer de la Tranquillité de 3,7 milliards d'années, prouvant que les continents devaient être encore plus anciens. Mais les mêmes études au télescope avaient montré que les continents étaient couverts de cratères superposés de dizaines de kilomètres de diamètre, ce qui montrait la trace d'un intense et sauvage bombardement de la Lune. Toute partie du socle rocheux « continental » originel doit avoir été fondue, écrasée, malaxée de façon répétée et répandue à travers la Lune. Bien que les continents contiennent la trace de l'histoire précoce de la Lune, il ne serait pas aisé de la lire. Les scientifiques ne pouvaient qu'attendre les échantillons réels pour voir dans quelle mesure ces traces de l'histoire pourraient être déchiffrées.

Les premiers alunissages d'Apollo apportèrent certaines indications montrant que des traces d'anciens événements persistaient dans les continents. Les petits morceaux d'anorthosite blanche dans les régolites de « mer » fournissaient des données sur la nature des continents, mais les pierres étaient trop petites pour faire des mesures d'âge. Cependant, la brèche étrange 12013, qui était probablement une roche de continent, montra un âge modèle de 4 milliards d'années. D'encore plus anciens âges modèles, d'environ 4,4 milliards d'années, furent reconnus sur des matériaux à KREEP de régolites.

Ces premiers résultats encouragèrent les scientifiques en attendant les alunissages sur les « continents ». Si les âges modèles anciens reflétaient réellement des événements lunaires répandus, alors les roches formées pendant ces événements pourraient se trouver encore sur les continents. Il semblait probable que n'importe quelle roche « continentale » fut plus ancienne que les plus vieilles roches jamais trouvées sur la Terre. Et il était raisonnable (**page 180**) d'espérer que quelque part sur

les continents, les premières roches formées sur la Lune depuis 4, 6 milliards d'années puissent être préservées, aussi bien dans les blocs de pierre des Monts Apennins, dans la formation Cayley sur Descartes que sur les collines entourant la Vallée Littrow.

Des roches continentales furent récoltées par quatre missions Apollo (14, 15, 16 et 17) à partir de quatre lieux distants de centaines de kilomètres. Malgré le fait intéressant que de nombreux échantillons fussent datés de plus de quatre milliards d'années, aucune des roches n'était aussi vieille que ce que les optimistes avaient espéré. Les âges des roches venant de Fra Mauro (Apollo 14) se regroupaient autour de 3,9 à 4 milliards d'années, vraisemblablement l'âge de formation du Bassin Imbrium. Les échantillons, principalement des brèches, rapportés par d'autres missions, étaient légèrement plus anciennes, de 4 à 4,2 milliards d'années ; la Roche de la Genèse (échantillon 15415) rapportée par Apollo 15, par exemple, avait 4,1 milliards d'années. Sans tenir compte du lieu, aucun échantillon « continental » n'avait un âge de formation aussi vieux que celui supposé de la formation de la Lune, soit 4,6 milliards d'années.

Certains échantillons de continents contenaient vraiment des traces rares et troublantes de plus anciens événements. Un spécimen notamment une brèche riche en olivine (échantillon 72417) récoltée par les astronautes d'Apollo 17 fournissait réellement un âge modèle de 4,6 milliards d'années, mais cette roche est tellement écrasée et déformée que son histoire est incertaine, et il est trop tôt pour la considérer comme un morceau de la croûte lunaire originelle ⁴⁰.

Dans d'autres échantillons récoltés à partir de Descartes (Apollo 16), des scientifiques trouvèrent des cristaux de plagioclase qui semblaient avoir deux âges différents. Les bords extérieurs des **(page 181)** cristaux étaient estimés à 4,2 milliards d'années environ, le même âge que celui mesuré sur les roches, mais les noyaux internes des cristaux étaient apparemment plus vieux, avec des âges estimés à 4,4 ou 4,5 milliards d'années. Aucune interprétation satisfaisante de ces résultats n'a encore été donnée. Une des explications possibles est que les cristaux se formèrent réellement il y a 4,5 milliards d'années et que leurs horloges radioactives furent partiellement remises à zéro par la chaleur il y a 4,2 milliards d'années, perdant alors aussi l'âge de formation plus ancien conservé lui dans les noyaux intacts des cristaux.

Bien que des analyses des roches continentales indiquèrent des âges de formation de 4 à 4,2 milliards d'années, le régolite continental vit ses âges modèle estimés à 4,4 – 4,6 milliards d'années. Cette découverte suggérait que le KREEP, ou quelque matériau semblable, avait été mélangé au régolite des continents comme il l'avait été dans le régolite des « mers ».

Pourquoi n'avons nous pas trouvé les roches réellement anciennes escomptées dans les continents ? Une raison est peut être que nous fûmes extraordinairement malchanceux dans notre échantillonnage. Peut-être de plus vieilles roches restent-elles à trouver quelque part sur la Lune, sur des continents

40 Un âge plus précis de 4,6 milliards d'années fut récemment rapporté à la septième conférence de la science lunaire en mars 1976. L'âge fut mesuré sur une roche cristalline (échantillon 76535) rapportée par la mission Apollo 17. Il semble maintenant clair que, malgré l'intense bombardement initial de la Lune, quelques roches lunaires aient conservé la trace de la formation de la Lune et de son histoire la plus ancienne. Ces résultats signifient aussi que la mission Apollo 17 atteignit vraiment son but dans la recherche des plus vieilles roches lunaires.

éloignés, près des pôles, ou peut-être sur la face cachée. Cette explication semble improbable, cependant, dès lors que les quatre sites d'alunissage sur les continents furent soigneusement sélectionnés pour apporter le maximum de chance dans la découverte de roches anciennes. Non seulement les sites eux-mêmes étaient séparés par des centaines de kilomètres, mais chaque site contenait des matériaux projetés par des impacts de météorites sur une vaste partie de la Lune. Nous pouvons être raisonnablement sûrs que les échantillons de continent sont représentatifs d'une grande partie de la Lune et que quelques spécimens de plus de 4,2 milliards d'années, s'il y en a, seront découverts.

Si nous acceptons la preuve apportée par des météorites et par les âges modèles élevés du régolite, alors la Lune a dû se former il y a environ 4,6 milliards d'années. Si nous ne pouvons pas trouver les plus vieilles roches continentales, alors quelque chose peut avoir détruit la plupart de celles-ci, exactement comme les plus vieilles roches formées sur la Terre furent détruites.

Sur notre propre planète, cette absence de nos premières traces est (**page 182**) facile à comprendre, car nous pouvons constater de nos propres yeux la destruction continue et la reconstruction de roches sous l'effet des forces d'érosion, de volcanisme et d'érection des montagnes. Mais rien n'indique que de tels processus ont été actifs sur la Lune de façon continue. Le volcanisme étendu cessa apparemment sur la Lune depuis plus de 3 milliards d'années et le seul changement que nous observons maintenant est la lente formation de la fine couche de régolite, processus trop lent pour être capable de détruire toutes les traces de l'histoire ancienne des « continents ».

A partir des données que nous avons obtenues, il semble que les premières roches continentales doivent avoir été détruites entre 4,4 et 4 milliards d'années par quelque processus ayant touché la planète entière. Un des processus qui a dû se produire à ce moment fut les séries d'impacts géants ayant formé les grands bassins de « mer ».

La formation cataclysmique de Mare Imbrium est datée d'environ 3,9 milliards d'années. Des observations géologiques ont montré que le Bassin Imbrium est seulement un des plus jeunes sur les 15 grands bassins circulaires de la face visible de la Lune. Les photographies d'Orbiter ont montré qu'un nombre semblable de bassins aussi grands se trouve sur la face cachée de la Lune, bien que les bassins de la face cachée ne soient pas remplis de coulées de lave. Il semble clair que, entre le moment de la formation de la Lune et environ 3,9 milliards d'années, la Lune fut percutée par plus de deux douzaines de corps de la taille d'un astéroïde aussi bien que par de nombreux autres plus petits. La fusion, l'écrasement et le malaxage des roches « continentales » originelles par ces différentes catastrophes pourraient être les modes de destruction des anciennes roches et de remise à zéro de leurs horloges radioactives à des niveaux d'âges plus récents que nous trouvons maintenant.

Cette modification cataclysmique des continents pendant le premier demi milliard d'années de l'existence de la Lune pourrait s'être produit de deux manières différentes, et les scientifiques sont divisés sur les détails de ce qui se produisit réellement. Un groupe prétend que tous les grands objets heurtèrent la Lune soudainement en une brève (**page 183**) « catastrophe terminale » entre 3,9 et 4 milliards d'années. Ce mécanisme expliquerait le fait que de si nombreuses roches lunaires ont des âges de formation qui se situent dans cet intervalle. Les âges de formation plus anciens (4 à 4,2

milliards d'années) s'expliqueraient par la présence de roches dont les horloges radioactives ne furent pas entièrement remises à zéro par le bombardement.

Cependant, l'idée de la « catastrophe terminale » n'explique pas « pourquoi » de si nombreux objets massifs percutèrent la Lune aussi tardivement un demi milliard d'années après sa formation. Si ces objets avaient été quelque part proches de la Lune, ils auraient été attirés par elle plus tôt. Quelque mécanisme particulier aurait été nécessaire pour « stocker » ces objets hors d'atteinte de la Lune pendant un demi milliard d'années et pour les envoyer ensuite s'écraser sur elle d'un seul coup.

Ce problème de stockage est esquivé parmi les arguments des autres scientifiques qui ne croient pas à la possibilité de la « catastrophe terminale ». Au lieu d'avoir subi un soudain tir de barrage de grands impacts il y a 4 milliards d'années, ils prétendent que la Lune a été continuellement percutée aussi bien par de grands que par de petits objets depuis sa formation, si bien que les roches les plus anciennes ont été continuellement détruites ou altérées par des impacts plus récents. De ce point de vue, les différents bassins de « mer » furent formés par de grands impacts qui se produisirent à moins de 50 à 100 millions d'années d'intervalle. Les âges estimés de ces bassins de « mer » par ces scientifiques se répartissent de 4,5 milliards d'années environ pour les plus vieilles (telles que Mare Nubium et Mare Tranquillitatis) à 3,8 – 3,9 milliards d'années pour les plus jeunes (Mare Imbrium et Mare Orientale).

A ce jour, nous ne savons pas quelle théorie est la bonne. Les deux peuvent expliquer l'échelle des âges que nous observons maintenant dans les roches de « continents ». Comme cela arrive souvent en science, les deux points de vue peuvent s'avérer en partie exacts. Il doit y avoir eu un bombardement intense associé à la formation de la Lune par accréation, et un essaim brusque de grands impacts pourrait s'être superposé lors des derniers moments de ce bombardement originel en cours de déclin.

(page 184) En tout cas, il est clair que le bombardement intense de la Lune cessa il y a 4 milliards d'années, car les roches formées depuis sont généralement intactes. La raison pour laquelle le bombardement diminua si rapidement à cette période n'est pas entièrement connue ; une éventualité est que virtuellement tous les objets disponibles de la taille d'un astéroïde à proximité de la Lune, puissent avoir été capturés par la Terre et la Lune, laissant relativement peu de matériau solide au voisinage immédiat.

La preuve d'un intense bombardement précoce de la Lune date réellement d'avant le programme Apollo. Les scientifiques qui firent des estimations des âges relatifs des surfaces lunaires à partir du nombre et de la taille des cratères de celles-ci remarquèrent que les continents étaient de loin beaucoup plus cratérés que les « mers ». Si le rythme de bombardement de la Lune avait été constant depuis sa formation, alors les continents devraient être très vieux et les « mers » très jeunes. Quand les échantillons d'Apollo prouvèrent que les mers étaient vieilles, il devint clair que les continents devaient avoir été bombardés plus intensément pendant le premier demi milliard d'années pour en arriver à la formation de tous les cratères présents.

Les décomptes de cratères montrent qu'une zone donnée des continents contient environ 30 fois plus de grands cratères (de 1 à 100 kilomètres de diamètre) qu'une même zone de la surface d'une « mer ». Les continents sont littéralement saturés de grands cratères se chevauchant comme un champ

de bataille couvert de cratères formés à la suite de tirs de barrage d'artillerie, si bien que les plus vieux cratères sont détruits au fur et à mesure de la formation des nouveaux.

Pendant leur premier milliard d'années, les continents furent bombardés 30 fois plus fortement que la Lune entière ne l'a été pendant les 3 milliards et demi d'années qui ont suivi. Si l'on essaie de calculer plus loin en arrière vers l'origine de la Lune, le rythme de bombardement approche des valeurs infinies et les équations mathématiques échouent ; il n'est donc pas surprenant que les plus vieilles roches de continent ne soient pas conservées sur la Lune. En fait, alors que les détails de cette période de 500 millions d'années de bombardement deviennent plus clairs, il semble presque surprenant que des roches de 4,2 milliards d'années (**page 185**) aient subsisté un tant soit peu.

Une des conséquences de ce bombardement primitif des continents fut le développement du régolite sur une grande échelle. Au moment de la fin du bombardement il y a 4 milliards d'années, les continents furent recouverts d'une couche de débris de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur voire de quelques kilomètres, composée principalement de strates différentes de matériau expulsé de chacun des grands bassins de « mer », et avec moins d'importance des millions de plus petits cratères formés en même temps. A cause de cette couche épaisse de débris sur les continents, il n'est pas surprenant que les échantillons récoltés soient tous des brèches complexes, et il est très peu probable qu'un quelconque socle rocheux originel soit jamais trouvé et mis à jour dans les continents.

L'ÂGE DE LA LUNE

Les échantillons lunaires, à quelques exceptions près, sont âgés de moins de 4,3 milliards d'années, et l'idée d'un bombardement cataclysmique de la jeune Lune a été proposée pour expliquer l'absence de roches plus vieilles. Cette explication est fondée sur notre hypothèse que la Lune se forma réellement au même moment que les météorites, il y a 4,6 milliards d'années. Si cette hypothèse est fausse, alors, la Lune pourrait être plus jeune que le reste du système solaire. La Lune se serait-elle formée voici environ 4,2 à 4,3 milliards d'années, âge de ses plus vieilles roches, après avoir existé sous forme de matière dispersée pendant plusieurs centaines de millions d'années, alors que les météorites s'étaient déjà formées ? En se fondant sur la preuve apportée par les roches de Lune elles-mêmes, la réponse à cette question doit être non.

Si nos idées actuelles sur l'origine du système solaire sont exactes, alors la Lune et les planètes se formèrent par la contraction et la condensation d'un énorme nuage en spirale de poussière et de gaz. Pendant tout le temps (**page 186**) au cours duquel le matériau du nuage de poussière originel resta bien mélangé et chimiquement homogène, les atomes parents radioactifs tels que l'uranium et le rubidium se désintégraient régulièrement en éléments fils. Au fil du temps, la quantité d'éléments fils augmentait régulièrement dans le nuage. Plus le nuage restait longtemps bien mélangé, plus il contenait d'éléments fils dans toute la matière solide qui allait former les météorites, la Lune ou les planètes.

En mesurant les quantités d'éléments fils, spécialement le strontium et le plomb, dans les météorites et les roches lunaires, les scientifiques pouvaient montrer que la matière solide qui compose ces objets ne pouvait pas être restée dans un nuage de poussière homogène depuis plus de quelques millions d'années. Le chiffre exact est incertain, et différentes études chimiques donnent des valeurs variant de

5 millions à 20 millions d'années environ. Néanmoins, les données sont suffisamment précises pour montrer que la Lune n'a pas pu se former plusieurs centaines de millions d'années après les autres planètes. Si cela s'était produit, toutes ses roches contiendraient beaucoup plus d'éléments fils que ce qui a été trouvé. De plus, la preuve que la Lune existait en tant qu'objet propre il y a environ 4,5 à 4,6 milliards d'années est apportée par les âges modèles élevés des matériaux KREEP du régolite.

Les analyses de roches lunaires renforcent aussi les modèles mathématiques qui suggèrent qu'il n'aurait pas fallu plus de quelques millions d'années pour former le Soleil et les planètes à partir du nuage de poussière originel. Il est probable que la Terre, la Lune et les autres corps du système solaire se formèrent tous ensemble à ce moment. Mais les données chimiques montrent que des différences fondamentales de composition chimique existaient déjà entre la Terre et la Lune au moment de la formation, par exemple, le déficit général des roches lunaires en éléments tels que l'hydrogène, le sodium, le potassium et le plomb. Ceci suggère fortement que la Terre et la Lune ne firent jamais partie de la même planète.

CHAPITRE 9

LA SURFACE LUNAIRE :

LE COUP DE SOLEIL D'UN MILLIARD D'ANNÉES

La surface de la Lune est un endroit désolé et hostile éloigné de tout ce qui touche à l'humanité. Comparés à la surface de la Lune, les déserts desséchés et brûlants de la Terre, les calottes glaciaires balayées par le vent sont confortables, conviviaux et grouillants de vie. Comme la Lune n'a pas d'atmosphère, la matière et l'énergie qui frappent sa surface exposée au reste de l'Univers, créent un environnement dans lequel rien ne peut vivre. Sous le rayonnement solaire, la température de surface monte au dessus du point d'ébullition de l'eau, pour s'effondrer largement en dessous du point de congélation pendant la nuit lunaire. Une pluie constante de particules cosmiques use les roches exposées et perfore le régolite de petits cratères. Et des particules atomiques, létales, à haute énergie, en provenance du Soleil et des étoiles creusent le régolite en laissant des traces définitives de leur passage.

Depuis plus de 4 milliards d'années, la surface de la Lune a été le théâtre d'une lutte continue entre ses roches dures, résistantes et le bombardement régulier, destructeur en provenance de l'Espace. Des impacts répétés remuent la couche de régolite et (**page 188**) augmente son épaisseur, ensevelissant le matériau de surface, alors que du socle rocheux nouvellement brisé et du régolite enfoui profondément sont remontés à la surface. Ce lent labourage se déroule depuis des milliards d'années, alors que la surface du régolite était exposée à la folie furieuse du Soleil.

L'étoile que nous appelons « Le Soleil » est essentiellement un énorme réacteur nucléaire. Il produit de l'énergie en « brûlant » ses atomes d'hydrogène pour fabriquer de l'hélium, dégageant une quantité d'énergie équivalente à l'explosion d'un milliard de bombes à hydrogène par seconde. Même sur la Terre, à 150 millions de kilomètres du Soleil, la lumière solaire brute serait immédiatement fatale à la vie si notre atmosphère n'arrêtait pas les rayons ultraviolets mortels, les Rayons X, les rayons gamma et les particules atomiques à haute énergie. C'est seulement depuis les deux dernières décennies que nous avons envoyé avec prudence des instruments, puis des hommes au delà de notre atmosphère pour observer la vraie nature du Soleil. Ainsi la surface lunaire sans protection a-t-elle été exposée à ce réacteur nucléaire gigantesque depuis des milliards d'années.

Seule une petite fraction de l'énergie solaire qui atteint la Lune est piégée définitivement par le régolite. La chaleur absorbée pendant les 14 « jours » lunaires est réémise dans l'Espace lorsque le sol

refroidit pendant les deux semaines suivantes de « nuit » lunaire. Les Rayons X primaires du Soleil sont rapidement transformés en Rayons X secondaires qui sont renvoyés dans l'Espace. Seules les particules atomiques les plus énergétiques venues du Soleil pénètrent profondément à l'intérieur du régolite, entraînant des changements définitifs.

Les effets produits sur le régolite par le Soleil sont semblables aux changements produits sur de petits échantillons exposés pendant des heures ou des jours dans nos réacteurs nucléaires construits sur Terre. Des transformations nucléaires se produisent, formant de nouvelles sortes d'atomes, et les particules atomiques à haute énergie laissent des traces indélébiles en traversant cristaux et fragments de verre. Mais l'irradiation de la Lune par le Soleil se fait à une énorme échelle. La surface de la Lune représente une superficie de 50 millions de kilomètres carré, et les radiations du Soleil y pénètrent sur environ **(page 189)** 10 centimètres de profondeur. Chaque mois donc, le Soleil provoque un « coup de soleil » indélébile sur 50 kilomètres cube de régolite. Par ailleurs, en raison du mouvement continu du régolite, ce sont probablement des milliers de kilomètres cube de matériau lunaire qui ont subi un « coup de soleil » pendant les trois derniers milliards d'années environ.

Les roches lunaires et le régolite contiennent aussi des traces de radiations beaucoup plus puissantes dont les énergies sont trop grandes pour être originaires de notre propre Soleil. Ces radiations à haute énergie, appelées rayons cosmiques galactiques, ont été détectés depuis de nombreuses années dans l'atmosphère terrestre et dans des météorites récemment tombées ; les scientifiques pensent qu'elles doivent avoir pris naissance entièrement en dehors de notre propre système solaire. Les rayons cosmiques produisent les mêmes effets généraux que les autres radiations venues du Soleil, mais les rayons cosmiques à haute énergie pénètrent plus profondément dans le régolite, produisant des changements perceptibles à des profondeurs de 1 à 2 mètres sous la surface.

COUP DE SOLEIL SUR LA LUNE

Le « coup de Soleil » sur les roches lunaires et le régolite concerne les changements définitifs produits par le passage des particules atomiques à haute énergie qui bombardent la Lune continuellement. Ces particules prennent naissance dans le Soleil et d'autres étoiles*(ndt dans le sens où il ne s'agit pas de molécules diatomiques), et elles voyagent à travers l'Espace sous forme de courants d'atomes simples, dont la plupart ont perdu des électrons et deviennent des ions chargés positivement.

Trois sortes principales de particules peuvent être différenciées en fonction de leur source et de leur origine. Le vent solaire consiste en particules à basse énergie émises continuellement à partir de l'atmosphère extérieure du Soleil. La plupart des particules sont des noyaux d'atomes d'hydrogène et d'hélium, mais des atomes plus lourds sont aussi présents. Les particules de vent solaire ont des énergies de quelques milliers d'électron volts, soit environ celles des électrons d'un tube de télévision ⁴¹. **(page 190)** Des éruptions solaires périodiques produisent des courants occasionnels de particules ayant des énergies de centaines de milliers d'électron volts. La plupart des particules énergétiques, trouvées dans les rayons cosmiques galactiques, ont des énergies de milliards d'électron volts, qui s'approchent de l'énergie des particules produites dans nos plus grands « accélérateurs de

⁴¹ Un électronvolt est l'énergie donnée à un seul électron en l'accélérant à travers une différence de potentiel de 1 volt. C'est une très petite quantité d'énergie, moins d'un milliardième de milliardième de calorie.

particules ».

Les effets « coup de soleil » sont produits par la collision de ces particules atomiques à haute énergie avec les atomes qui constituent les cristaux et les fragments de verre du régolite. Deux sortes d'effets se produisent : des réactions nucléaires et des traces de particules. Des réactions nucléaires se produisent quand une particule à haute énergie d'hydrogène ou d'hélium frappent les atomes lunaires et les changent en atomes de différents éléments. Des traces de particules sont produites par des atomes plus lourds, souvent aussi lourds que le fer ; les traces consistent en une traînée microscopique indélébile qui marque le passage d'atome à haute énergie à travers le cristal.

Différents effets « coup de soleil » se produisent à des profondeurs différentes du régolite, dépendantes de l'énergie de la particule concernée. Plus l'énergie est grande, plus profonde est la pénétration dans le régolite (voir tableau 1). Les particules à basse énergie du vent solaire ne traversent pas plus d'un millième de millimètre de matériau solide, et elles sont absorbées sur la superficie des grains minuscules. Les particules de plus haute énergie des éruptions solaires pénètrent plus loin, environ 10 centimètres dans le régolite, alors que les rayons cosmiques des plus hautes énergies peuvent produire des réactions nucléaires détectables jusqu'à quelques mètres sous la surface.

LE VENT SOLAIRE

Le vent solaire est un courant d'atomes permanent en dehors de la partie supérieure de l'atmosphère solaire. Dans cette partie du Soleil, (**page 191**) les températures sont si élevées que les atomes ont un mouvement suffisamment rapide (plusieurs centaines de kilomètres par seconde) pour s'échapper du champ gravitationnel du Soleil. Comme les atomes sont chargés, ils sont accélérés dans l'Espace par le champ magnétique du Soleil, et éventuellement ils balayent la Terre, la Lune et les autres planètes. Le vent solaire est une découverte relativement nouvelle. Son existence fut soupçonnée à la fin des années 1950 par les scientifiques étudiant le soleil, et il fut détecté par des sondes automatiques lancées plusieurs années plus tard.

Les courants d'atomes de vent solaire traversent l'espace à environ 500 kilomètres par seconde. C'est de nombreuses fois la vitesse d'un vaisseau spatial se dirigeant vers la Lune, mais c'est une progression lente (**page 192**) comparée à la vitesse de la lumière — 300 000 kilomètres par seconde. La lumière fait un voyage de 150 000 000 de kilomètres du Soleil à la Terre en 8 minutes ½ environ, alors que le vent solaire met environ deux jours pour faire le trajet.

Tableau 1 : Effets du « coup de soleil » sur les roches lunaires et le régolite

SOURCE ET ÉNERGIE DES PARTICULES	NATURE DES PARTICULES	EFFET PRODUIT PAR LES PARTICULES	PROFONDEUR MAXIMUM DE L'EFFET
-------------------------------------	-----------------------------	-------------------------------------	----------------------------------

Vent solaire énergie faible environ 1 000 ev *	Atomes légers (hydrogène et hélium) prédominants, plus rares atomes plus lourds (carbone, azote, oxygène, etc.)	Atomes piégés dans la couche superficielle amorphe de grains de poussière lunaire ; réactions chimiques Très petites traînées de particules	Moins de 0,001 mm Moins de 0,001 mm
<i>Éruptions solaires</i> haute énergie (1 à 100 millions d'ev)	Atomes légers (hydrogène et hélium) prédominants, plus rares atomes lourds (par ex. calcium, fer)	Réactions nucléaires ** Traînées de particules **	Environ 6 cm Environ 3 mm
<i>Rayons cosmiques galactiques</i> très haute énergie (1 à 10 milliards d'ev)	Atomes légers (hydrogène et hélium) Atomes lourds (par ex. calcium, fer)	Réactions nucléaires ** Traînées de particules **	1 à 2 mètres Environ 10 cm
* ev = électron-volts ; mm = millimètre (environ 1/25 d'inch) ** indique les effets les plus habituellement utilisés pour évaluer les temps d'exposition sur les échantillons lunaires.			

Comparé au quasi-vide de l'Espace, le vent solaire contient une grande quantité de matériau, habituellement 2 à 5 atomes par centimètre cube. Près de l'orbite de la Terre, plusieurs centaines de millions de particules de vent solaire heurtent chaque centimètre carré de surface chaque seconde. Pas une seule partie de matériau n'atteint la surface de la Terre ; la plus grande partie du vent solaire est déviée par le champ magnétique puissant de la Terre, et une petite partie est piégée par la haute atmosphère. Sur la Lune, qui a ni atmosphère ni champ magnétique significatif, la totalité du vent solaire percute la surface et est piégée par le régolite. Depuis la formation des mers lunaires il y a 3 milliards ½ d'années, plusieurs trillions de tonnes de matière se sont accumulés sur la Lune à partir du Soleil, transportés là par le vent solaire. (C'est seulement environ un dix millionième du poids de la Lune, donc la Lune ne prend guère de poids en consommant du vent solaire).

Comme le Soleil est composé presque entièrement d'hydrogène et d'hélium, ce sont les atomes les plus habituels du vent solaire. Le Programme Expérimental sur la Composition du Vent Solaire embarqué par Apollo (voir page 92) détecta aussi de petites quantités d'atomes plus lourds tels que le néon, l'argon, le krypton et le xénon ; et des analyses du régolite ont identifié plus tard du carbone, de l'oxygène et de l'azote comme autres composants piégés du vent solaire. Les expériences d'Apollo montrèrent que le rapport de l'hélium et de l'hydrogène dans le vent solaire était d'environ 0,04 seulement, alors que les rapports d'environ 0,1 avaient été mesurés dans la haute atmosphère du Soleil. Ceci suggère que certains processus se produisant dans la haute atmosphère du Soleil retiennent des atomes d'hélium et éjectent préférentiellement des atomes d'hydrogène dans l'Espace.

Les atomes à basse énergie du vent solaire sont piégés dans de petites particules du **(page 193)** régolite et ne pénètrent pas à plus de un millième de millimètre de profondeur. Les atomes d'éléments gazeux, tels que l'hélium et d'autres gaz nobles, peuvent être expulsés du régolite sous l'effet de la chaleur, et les scientifiques qui firent l'expérience sur les premiers échantillons de régolite rapportés furent étonnés de découvrir la grande quantité de gaz contenu dans le régolite. En les faisant fondre en laboratoire, les échantillons dégageaient souvent des quantités de gaz équivalentes à leur propre volume. Des études microscopiques de particules de régolite montrèrent qu'une grande partie du gaz se présente sous forme de minuscules bulles sous haute pression dans les cristaux. Les études de ces gaz de vent solaire sont importantes car ils représentent une trace de l'activité du Soleil depuis des millions et peut-être des centaines de millions d'années.

Dans les parties les plus extérieures des petits cristaux et des fragments de verre du régolite, les atomes du vent solaire produisent aussi de minuscules traînées de particules de moins d'un millième de millimètre de long. Ces traînées se forment si rapidement qu'un simple grain peut contenir des milliards de traces par millimètre carré de surface. Parfois, ces traces de particules sont si nombreuses que la surface extérieure d'un grain est transformée en un matériau amorphe dont les propriétés sont tout à fait différentes de celles du grain originel. La nature exacte de cette pellicule amorphe est le sujet d'étude provoquant beaucoup d'intérêt car son importance peut s'étendre au delà de la Lune. La couche extérieure peut aider de petites particules de l'espace à se coller ensemble pour en former de plus grandes et ainsi commencer le processus complet de l'accrétion planétaire. Les surfaces amorphes peuvent aussi favoriser la catalyse nécessaire à la formation de molécules chimiques complexes à partir des atomes du vent solaire, faisant ainsi les premiers pas du parcours pouvant conduire à la vie.

(page 194)

ÉRUPTIONS SOLAIRES ET RAYONS COSMIQUES

Le vent solaire est un phénomène régulier, à basse énergie dont les effets sur les roches lunaires sont légers et limités à une fine couche en surface. Au contraire, les éruptions solaires sont brusques et violentes à la surface du Soleil. Les éruptions solaires arrosent la surface lunaire de jets de particules à haute énergie et produisent des changements indélébiles et perceptibles à des profondeurs de plusieurs centimètres dans le régolite. Une éruption solaire typique est brève, durant habituellement de quelques minutes à quelques heures, mais elle peut couvrir une région du Soleil sur des milliers de kilomètres

de large et produire des températures atteignant 40 000 °C, de nombreuses fois plus élevées que la température normale de surface du Soleil qui est d'environ 6 000 °C.

Les particules atomiques qui sont éjectées du Soleil lors des éruptions solaires sont les mêmes que celles du vent solaire, principalement hydrogène et hélium avec des traces d'éléments plus lourds. Mais les particules d'éruptions solaires sont expulsées en dehors du Soleil avec des énergies beaucoup plus grandes, et elles voyagent à des vitesses beaucoup plus proches de celle de la lumière, souvent près de 150 000 kilomètres par seconde. Même si ces particules énergétiques ne peuvent pas pénétrer le bouclier protecteur de l'atmosphère terrestre, elles sont assez fortes pour perturber les propriétés électriques de l'atmosphère et pour interrompre les communications radio. Dans l'Espace, au delà de la protection de l'atmosphère, les particules d'éruptions solaires peuvent pénétrer un vaisseau spatial et créer un danger potentiel pour les astronautes, tout comme les rayons X intenses ou la radioactivité sont dangereux pour les êtres vivants à la surface de la Terre.

Sur la surface de la Lune, les particules de vent solaire peuvent pénétrer de plusieurs centimètres le régolite. Des traînées de particules produites par les atomes d'éruptions solaires peuvent être détectées dans les quelques millimètres superficiels des roches lunaires, et l'abondance de telles traînées peut atteindre plusieurs centaines de millions dans un grain d'un millimètre. Des réactions nucléaires peuvent être produites par des particules solaires à des profondeurs de plusieurs centimètres dans le régolite.

(page 195) Les rayons cosmiques galactiques d'énergie encore plus élevée sont semblables aux particules d'éruptions solaires et consistent aussi en atomes énergétiques. Cependant, les particules de rayons cosmiques voyagent beaucoup plus rapidement, proches de la vitesse de la lumière, et elles contiennent plusieurs fois l'énergie des particules d'éruption solaire. Leurs énergies, mesurées en milliards d'électrons volts, sont trop grandes pour avoir été produites par le Soleil, donc elles doivent venir de l'extérieur du système solaire, peut-être d'autres étoiles ou de régions interstellaires de notre propre Voie Lactée. Les rayons cosmiques ont dû voyager depuis des milliers ou peut-être des dizaines de milliers d'années, avant de frapper la Lune. On connaît peu de choses sur ces particules étranges et puissantes qui sont assez fortes pour produire des réactions nucléaires à quelques mètres de profondeur dans le régolite, et les traces qu'elles laissent sont une source d'information passionnante sur l'histoire de l'Univers en dehors de notre propre système solaire.

Les scientifiques liés à la Terre ont étudié les rayons cosmiques au moyen de détecteurs sensibles et d'instruments placés dans des satellites, depuis de nombreuses années, mais une des surprises majeures du Programme Apollo fut la découverte inattendue de la possibilité pour des êtres humains dans l'espace de détecter des rayons cosmiques sans aucun instrument. Les astronautes d'Apollo 11 rapportèrent que, pendant la mission, ils « virent » de temps en temps des rayons de lumière brillants avec leurs yeux fermés. Des études soigneuses sur les missions suivantes établirent que les rayons étaient dus au passage de particules atomiques à haute énergie à travers les globes oculaires. L'œil humain se révéla être un instrument de détection vraiment sensible des particules de rayon cosmique. Avec leurs yeux fermés, de nombreux astronautes pouvaient « voir » un rayon toutes les 3 minutes environ quand ils étaient dans l'Espace entre la Terre et la Lune.

Une façon plus conventionnelle de mesurer l'exposition des astronautes aux rayons cosmiques fut d'étudier leurs casques en matière plastique. Une particule de rayon cosmique passant à travers un casque laisse une minuscule trace de plastique endommagé. Ces traces sont révélées en traitant le casque au moyen de certains **(page 196)** produits chimiques, les faisant apparaître sous forme de minuscules trous dans le plastique (photo 29). Le décompte des trous donne le nombre de rayons cosmiques ayant traversé le casque pendant la mission.

Ces observations montraient que les astronautes furent exposés à un nombre croissant de rayons cosmiques pendant les dernières missions. Les casques des premières missions, telles que Apollo 8 et 11, contenaient environ une trace pour 2 centimètres carré de surface, ou environ 0,5 trace par centimètre carré. Les casques des dernières missions montraient environ 3 traces par centimètre carré, même après que des corrections aient été faites en fonction des plus longues durées des dernières missions.

Cette augmentation apparente des rayons cosmiques pendant les dernières missions Apollo peut avoir pour cause plusieurs facteurs. Il est possible que lors des premières missions, les casques aient pu avoir été rangés dans une partie plus protégée du vaisseau spatial où une moindre quantité de rayons cosmiques aient pu les atteindre. Une autre explication est que l'activité du Soleil, qui suit un cycle régulier de 11 ans, ait été en phase décroissante légère pendant les dernières missions. Alors que l'intensité du champ magnétique du Soleil diminuait, une plus grande quantité de rayons cosmiques pouvait pénétrer de l'extérieur du système solaire vers la région occupée par la Terre et la Lune.

Les études des rayons cosmiques étaient importantes aussi bien sur le plan médical que scientifique, parce que les particules atomiques à haute énergie des rayons cosmiques peuvent pénétrer dans les cellules vivantes d'animaux et d'humains et les détruire. Avant les missions Apollo, nos connaissances indiquaient que les rayons cosmiques ne seraient pas un danger pendant de relativement courts trajets vers la Lune. Mais avec des hommes réellement dans l'Espace, des mesures plus précises d'exposition aux rayons cosmiques pouvaient être faites, et des scientifiques pouvaient mieux apprécier les possibles dangers pour les astronautes d'Apollo et pour de futurs voyageurs de l'Espace.

Les données obtenues à partir des casques et des éclairs dans les globes oculaires étaient rassurantes pour le moment. Les rayons cosmiques sont sans danger pour les astronautes pendant les quelques semaines d'une mission lunaire. Mais pendant un plus long séjour dans l'espace, tel qu'un trajet de 2 ans vers Mars, l'exposition aux rayons cosmiques **(page 197)** pourrait être un danger significatif, et une plus grande protection du vaisseau spatial et des astronautes serait nécessaire.

COMMENT DÉCHIFFRER UN « COUP DE SOLEIL »

Des roches lunaires soumises à un « coup de soleil » ressemblent beaucoup à une personne brûlée par le Soleil. Dans les deux cas, l'exposition au Soleil produit des effets caractéristiques, sans tenir compte du fait que le spécimen se trouve sur la Lune ou sur une plage terrestre. A partir des effets définitifs du « coup de soleil » lunaire sur les roches et le régolite, les géologues peuvent déterminer quand une roche fut exposée, combien de temps elle fut exposée, quelle position elle avait, de quelle épaisseur de régolite elle était recouverte. A partir de cette information, ils peuvent décrypter à la fois

le film du mouvement du régolite et le passé du Soleil.

Le type de « coup de soleil » pris par une roche lunaire dépend de la profondeur de son ensevelissement dans le régolite (voir tableau I). En dessous de 2 mètres environ, pratiquement aucune radiation extérieure ne pénètre, donc roches et régolite en dessous de ce niveau ne prennent aucun « coup de soleil » mesurable. Les deux mètres les plus superficiels du régolite peuvent être divisés en trois couches dans lesquelles différentes sortes de « coup de soleil » se produisent : une couche inférieure entre 2 mètres et environ 10 centimètres de profondeur, une couche comprise entre 10 centimètres et la surface, et la surface elle-même.

Roches lunaires et régolite situés moins de deux mètres sous la surface sont pénétrés par les particules de rayons cosmiques à haute énergie qui frappent les atomes du matériau lunaire et produisent des réactions nucléaires. Les réactions créent de nouveaux atomes, et plus l'échantillon est exposé longtemps aux rayons cosmiques, plus nombreux seront les nouveaux atomes créés. Des scientifiques peuvent déterminer ce que l'on appelle un « temps d'exposition » en mesurant les quantités de nouveaux atomes formés dans le spécimen. Les rayons cosmiques produisent (**page 198**) environ 20 sortes différentes d'atomes dans les roches lunaires, tous étant des isotopes d'éléments connus. Les isotopes les plus fréquents utilisés pour mesurer les temps d'exposition sont : le néon 21, l'aluminium 26, l'argon 39, le nickel 59 et le krypton 81. En utilisant différents éléments, plusieurs mesures de temps d'exposition indépendantes peuvent être faites sur le même échantillon, apportant ainsi une vérification de la précision de temps d'exposition obtenu.

Des échantillons plus superficiels subissent des effets différents de « coup de soleil ». Un échantillon à moins de 10 centimètres de la surface contiendra des traînées de particule causées par le passage de rayons cosmiques à haute énergie. Une traînée de particule est une trace d'endommagement à l'échelle atomique produite alors que la particule force son chemin à travers un fragment de minéral ou un morceau de verre. Exactement comme les traînées sur les casques d'Apollo, les traînées sur les roches lunaires peuvent être gravées sous forme de trous visibles en utilisant des produits chimiques qui conviennent. Les traînées n'ont que quelques centièmes de millimètre de long, mais elles peuvent être observées facilement et comptées sous le microscope.

L'observation de grains minuscules de régolite a montré qu'ils étaient littéralement criblés de traînées de particules de rayons cosmiques. Un grain d'un millimètre carré seulement peut contenir des millions de traînées distinctes. Plus un grain de fragment de roche reste longtemps à une profondeur de moins de 10 centimètres de la surface, plus il accumulera de traînées de particules, et à partir du nombre de traînées, les scientifiques peuvent calculer une seconde sorte de temps d'exposition qui évalue le temps que l'échantillon a passé près de la surface de la Lune.

Des échantillons de cette zone de moins de 10 centimètres montrent aussi des réactions nucléaires produites par les particules atomiques à basse énergie venant des éruptions solaires. Dans le centimètre supérieur, environ, de cette couche, des atomes d'éruption solaire produisent aussi des traînées de particule.

Heureusement, il est possible de différencier à la fois les réactions nucléaires et les traînées de particule produites par les éruptions solaires de celles produites par les rayons cosmiques à plus haute

énergie. Une méthode pour séparer ces effets est basée sur le fait que les particules (**page 199**) d'éruptions solaires ne pénètrent pas aussi loin dans la matière solide que les rayons cosmiques plus énergétiques. Suivant les instructions des scientifiques, les astronautes de plusieurs missions récoltèrent de grandes roches de la taille d'un pamplemousse environ. Les particules des éruptions solaires ne pénètrent que sur une partie de l'épaisseur de telles roches, alors que les rayons cosmiques plus puissants les traversent tout droit. En comparant le nombre de traînées dans le centre d'une roche avec le nombre de traînées observées près de la surface, il est possible de trier les effets des éruptions solaires de celles des rayons cosmiques.

Finalement, une roche de la surface de la Lune prend une troisième sorte de « coup de soleil » sous la forme de nombreuses petites traînées produites par les particules à basse énergie du vent solaire qui pénètrent seulement dans une fraction de millimètre des roches et du régolite. Aussi bien les microcratères causés par le bombardement par les particules de poussière cosmique que les traînées de particules de vent solaire apparaissent seulement sur la surface de la Lune et seulement sur la partie supérieure des roches exposées.

Le « coup de soleil » sur un échantillon lunaire unique est le résultat final de plusieurs processus compliqués. Le « coup de soleil » dépend de la vitesse avec laquelle le régolite est remué et malaxé, de la profondeur à laquelle est enseveli un spécimen et du temps pendant lequel le spécimen reste enseveli à différentes profondeurs. Le malaxage du régolite dépend du rythme avec lequel des particules solides percutent la Lune, mais ce même rythme de bombardement détermine aussi combien de temps une roche soumise à « un coup de soleil », exposée à la surface, survivra avant d'être érodée par de petites particules ou fragmentée par de plus grandes. Comme si cette complexité n'était pas suffisante, le « coup de soleil » lunaire reflétera aussi tous les changements concernant les rayons cosmiques ou l'intensité du soleil pendant les milliards d'années écoulées.

Dans le but d'éclaircir ces interactions, l'étude des roches lunaires soumises au « coup de soleil » se poursuit par étapes, en commençant par des mesures et en terminant par des calculs et des théories. Les scientifiques déterminent d'abord les temps d'exposition sur de nombreuses roches et échantillons de régolite. A partir des âges d'exposition, des hypothèses peuvent être émises sur le mouvement du régolite. Puis les mouvements calculés du (**page 200**) régolite apportent des estimations sur le rythme du bombardement. Finalement, alors qu'une grande quantité de données continue de s'accumuler, l'histoire passée du Soleil et des rayons cosmiques galactiques commence à apparaître.

DURÉES D'EXPOSITION : LES VOYAGES D'UNE ROCHE LUNAIRE

Les premiers âges d'exposition des échantillons rapportés par Apollo 11 confirmèrent déjà la vieille idée selon laquelle les choses changent très lentement sur la Lune. Les roches récoltées sur la surface lunaire ont été à moins de 2 mètres sous la surface pendant des périodes s'étalant de 10 à 500 millions d'années. Les roches récoltées lors des missions suivantes avaient des âges d'exposition similaires, d'où il est fermement établi maintenant que des fragments de roche peuvent rester intacts à la surface de la Lune pendant des dizaines ou des centaines de millions d'années. Cependant, les roches elles-mêmes sont un grand nombre de fois plus anciennes, avec des âges de formation mesurés entre 3,3 et 4,2 milliards d'années. Les fragments de roche, malgré leurs âges d'exposition élevés, ont néanmoins

passé seulement une petite fraction de leur durée de vie sous forme de morceaux brisés près de la surface lunaire.

La longue survie des roches à la surface de la Lune confirme ce qui fut montré par l'étude des morceaux récupérés sur Surveyor 3, c'est à dire que l'érosion sur la Lune est un processus lent. Il faut plusieurs millions d'années pour que le bombardement par de petites particules cosmiques arrive à effacer une couche d'un seul millimètre d'épaisseur de la surface d'une roche lunaire récemment exposée. Cependant, la surface externe lisse et arrondie de nombreuses roches exposées est un témoin éloquent des millions d'années qu'elles ont passées posées sur la Lune sans que rien ne vienne les troubler.

Les durées d'exposition mesurées sur les échantillons de régolite varient beaucoup car le régolite est un mélange de vieux et de nouveaux matériaux qui ont été exposés durant des laps de temps très différents. L'âge d'exposition moyen des échantillons de régolite, **(page 201)** environ 400 millions d'années, est semblable aux âges d'exposition mesurés sur de nombreux fragments de roche. Cependant, certaines particules fines du régolite ont été exposées depuis plus longtemps. Les âges d'exposition déterminés pour certains minuscules grains de minéraux en mesurant les traînées de particules atteignent 1 700 millions d'années. Ceci indique que de grandes roches ne restent pas intactes perpétuellement sur la surface lunaire. Après un milliard d'années environ, elles sont brisées en plus petits grains qui par la suite restent sur la surface de la couche de régolite.

Les durées d'exposition des roches peuvent aussi être utilisées pour dater la formation des cratères de la surface lunaire. Même un cratère relativement petit de 50 à 100 mètres de diamètre est assez profond pour pénétrer à travers la couche de régolite, et la formation de tels cratères fait remonter de grandes quantités de socle rocheux frais qui n'a jamais été exposé au Soleil. Les âges d'exposition de ces fragments extraits indiquent donc le moment de la formation du cratère.

De nombreux échantillons d'Apollo 11 ont des durées d'exposition proches de 100 millions d'années. Ceci, par exemple, peut être l'âge de West Crater près du site d'alunissage. Lors des missions suivantes, les scientifiques purent faire le lien entre des échantillons et des cratères précis avec une grande certitude. De nombreux échantillons d'Apollo 14 ont des âges d'exposition de 25 à 30 millions d'années, âge presque certain du Cratère Cône. Les deux cratères les plus saillants du site d'alunissage Descartes (Apollo 16) sont aussi bien datés. Le plus ancien, le plus érodé, North Ray Crater est âgé d'environ 50 millions d'années, alors que le plus jeune, le plus frais, South Ray Crater, se forma il y a seulement 2 millions d'années. Shorty Crater, dans la Vallée Littrow, (Apollo 17) se forma il y a environ 30 millions d'années, révélant le Sol Orange. Les âges d'exposition de différentes roches d'Apollo 15 et 17 montrent que des impacts encore plus récents se sont produits il y a moins d'un million d'années, alors que les cratères correspondants eux-mêmes n'ont pas encore été identifiés.

Malgré la lenteur des changements sur la surface lunaire, certaines roches lunaires ont pu voyager loin de leur lieu d'origine et les effets de « coup de soleil » sur les échantillons ont gardé **(page 202)** la trace du calendrier précis de leurs déplacements. La trace du « coup de soleil » marque les étapes du voyage d'une roche depuis le socle rocheux enfoui en remontant à travers le régolite vers la

surface, et permet même de suivre les mouvements de la roche sur la surface, cette roche ayant été retournée et bousculée par de petits impacts de météorite tous les quelques millions d'années environ.

L'histoire de l'évolution de l'échantillon 10017, une des plus grandes roches rapportées par Apollo 11 de la Mer de la Tranquillité, couvre l'histoire de la Terre et de l'espèce humaine comme aucune trace terrestre ne le fait. La roche 10017 provenait de lave fondue il y a 3,6 milliards d'années environ et restait ensevelie profondément sous le régolite depuis plus de 3 milliards d'années. Il y a environ 500 millions d'années, quand les premiers animaux organisés commençaient à apparaître dans les océans terrestres, un impact de météorite écrasait le socle rocheux et propulsait le fragment de roche dans le régolite. Depuis près d'un demi milliard d'années, la roche 10017 est ensevelie entre 10 centimètres et 2 mètres de profondeur dans le régolite, pendant que toutes les formes de vie florissantes évoluaient sur la Terre. Il y a 6 millions d'années, longtemps après l'arrivée et le départ des Dinosaures, un autre impact propulsa la roche 10017 sur la surface de la Lune. Elle fut retournée sens dessus dessous 3 millions d'années plus tard environ, juste au moment où un petit groupe d'animaux d'allure simiesque, en Afrique, fabriquaient des outils et commençaient à évoluer vers ce qui aboutira à l'Homme. Trois millions d'années après cela, un de leurs lointains descendants, habillé d'un scaphandre, se posait sur la Lune, ramassait la roche 10017 et la rapportait sur Terre.

L'AVERSE DE GRÊLE COSMIQUE : TROMBE D'EAU OU CRACHIN ?

Les fragments de roches exposées sur la surface lunaire ont joué un rôle central dans la détermination de la fréquence avec laquelle la Lune a été la cible de grandes et petites particules venues de l'Espace. Avant les alunissages d'Apollo, nos estimations du rythme de bombardement cosmique (**page 203**) se basaient sur le dénombrement des cratères vus au télescope sur la Lune et à partir des instruments installés dans des satellites artificiels. Les deux méthodes étaient pleines d'incertitude ; les âges des surfaces lunaires n'étaient pas bien connus et les instruments des satellites donnaient souvent de faux indices, apportant des chiffres concernant les rythmes de bombardement qui s'avérèrent être trop élevés avec un facteur d'erreur aussi important que 100.

La surface exposée d'une roche lunaire est un compteur naturel de particules. Les infimes particules de poussière cosmique à mouvement rapide heurtant la roche produisent de minuscules microcratères cernés de verre. Si l'âge d'exposition de la roche est connu, il nous suffit seulement de compter les cratères sur les surfaces exposées pour calculer le rythme de bombardement auquel la roche a été soumise.

Les missions Apollo confirmèrent la preuve que le bombardement de la Lune par la poussière cosmique se poursuit aujourd'hui, car les vaisseaux spatiaux Apollo eux-mêmes furent frappés à répétition (mais sans faire de mal) par de minuscules particules. Un examen minutieux des hublots du vaisseau spatial Apollo après le retour sur Terre révéla environ 10 cratères très fins, le plus grand ayant seulement un demi millimètre de diamètre. Les roches lunaires cratèrisées présentent des empreintes remontant beaucoup plus loin, à des milliers voire des millions d'années.

Pour autant que l'on sache, le rythme d'impacts des petites particules de poussière sur la Lune a été constant depuis les quelques derniers millions d'années. Cependant, certaines études récentes ont soulevé des questions à propos de cette supposition. Les scientifiques qui firent une étude complète

des microcratères sur un échantillon de grande taille rapporté par Apollo 16 (60015) (voir photo 26) purent dater les âges de formation de microcratères distincts en étudiant les traînées de particules d'éruptions solaires incluses dans le cerne en verre de chaque cratère. La roche avait été exposée sur la surface lunaire depuis environ 80 000 ans, mais les données montrent qu'un plus grand nombre de microcratères furent formés pendant les dernières 10 000 années que pendant les premiers stades d'exposition de la roche.

Une telle augmentation de la formation de microcratères signifierait un afflux brusque de particules de poussière dans l'espace Terre-Lune (**page 204**) il y a environ 10 000 ans. Une explication possible est l'arrivée d'une nouvelle comète qui commença à répandre de la poussière en se rapprochant du Soleil. La comète Encke, découverte pour la première fois en 1795, et qui passe autour du Soleil tous les 3,3 ans, est une possibilité logique pour expliquer cette nouvelle source de poussière puisqu'elle passe si souvent dans l'orbite de la Terre.

Mais il n'y a pas encore assez de données pour savoir si cette augmentation récente est un effet réel ; plus d'informations, à partir de nouveaux échantillons, seront nécessaires. A présent, cependant, il y a une possibilité encourageante pour penser que des roches lunaires pourraient être utilisées comme des « détecteurs de comète » qui enregistreraient la trace du passage de ces objets étranges et mal compris.

L'ATMOSPHÈRE LUNAIRE : QUELLE SORTE DE NÉANT ?

Une atmosphère est une enveloppe gazeuse qui se trouve au dessus de la surface solide d'une planète et retenue proche par la force de gravité. La nature et la composition chimique de l'atmosphère apporte d'importantes informations sur l'origine et l'évolution de la planète elle-même. Les atmosphères ne sont pas difficiles à étudier. Même les atmosphères des planètes lointaines comme Mars et Jupiter peuvent être analysées par des instruments à partir de la Terre, cependant qu'un vaisseau spatial chargé d'instruments peut apporter encore plus d'informations détaillées sur les atmosphères planétaires à partir de distances de millions de kilomètres.

Les gaz qui composent l'atmosphère d'une planète peuvent avoir de nombreuses sources : la nébuleuse solaire pendant la formation de la planète, l'intérieur de la planète, les activités de la vie ou le vent solaire. L'hydrogène et l'hélium qui forment l'essentiel de l'atmosphère de la planète géante Jupiter sont probablement originels, retenus depuis des milliards d'années par la puissante force de gravité de la planète. Au contraire, il semble que, pratiquement toute l'atmosphère terrestre fut formée par des gaz provenant de l'intérieur de la Terre pendant de longues périodes (**page 205**) d'activité volcanique. Une telle origine semble probable pour l'azote qui représente les 4/5 de notre atmosphère, l'eau de nos océans, le gaz carbonique et l'eau qui sont présents en très petites quantités dans notre air. L'oxygène, qui représente 1/5 de notre atmosphère et entretient la vie sur notre planète, fut probablement produite à partir du dioxyde de carbone originel grâce à l'activité de la vie végétale pendant des milliards d'années. L'atmosphère de Jupiter peut contenir le matériau originel de la nébuleuse solaire, mais la composition de l'atmosphère terrestre témoigne des modifications chimiques dues à la vie.

La Lune est complètement différente des grandes planètes. En pratique, l'atmosphère lunaire est

absente. Cependant, l'espace situé au dessus de la surface de la Lune n'est pas entièrement vide. Près de la surface lunaire se trouve un essaim ténu d'atomes de gaz détectés uniquement par des instruments sensibles. La pression de cette « atmosphère » lunaire n'atteint même pas les 1/dix trillièmes de celle de la Terre, mais même ainsi, il y a encore plusieurs millions d'atomes par centimètre cube ⁴².

L'abondance et la nature de ces atomes peuvent nous en dire plus sur ce qui se passe à la fois sur la Lune et à l'intérieur de la Lune. Les atomes légers, tels que l'hydrogène et l'oxygène, ne peuvent pas être retenus longtemps par la faible gravité de la Lune ; si ils sont **(page 206)** présents dans l'atmosphère lunaire, ils doivent, d'une façon ou d'une autre, être continuellement produits sur la surface de la Lune, soit à partir du vent solaire ou à partir de quelque source à l'intérieur de la Lune. Cependant, les gaz plus lourds, tels que l'argon ou le krypton, pourraient avoir été retenus par la Lune depuis sa formation. La présence et la composition même de très petites quantités de gaz lunaires purent nous en dire beaucoup à propos de la Lune, dès lors que les missions Apollo installèrent des détecteurs sensibles sur la surface de la Lune et en emmenèrent d'autres en orbite lunaire pour rechercher de quelle sorte de gaz il s'agissait.

Les détecteurs trouvèrent que l'atmosphère lunaire ténue consiste principalement en éléments hydrogène, hélium, néon et argon. Les instruments détectèrent aussi plusieurs gaz qui étaient clairement d'origine humaine. L'azote était produit par les moteurs de fusée pendant l'alunissage et le décollage. Les instruments de surface, qui étaient assez sensibles pour détecter quelques centaines de molécules de gaz, enregistraient facilement les très petites fuites inoffensives de vapeur d'eau et d'oxygène en provenance des scaphandres des astronautes quand ils les approchaient. Finalement, des jets de vapeur d'eau et d'autres gaz furent dégagés par l'étage du module lunaire de descente abandonné, pendant des semaines et des mois après le retour sur Terre des astronautes. Heureusement ces apports d'origine humaine sont éliminés de l'atmosphère par le gel pendant la nuit lunaire glacée, si bien que les mesures de nuit purent déterminer la vraie nature de l'atmosphère lunaire.

Les très petites quantités de gaz lunaires détectées viennent apparemment de plusieurs sources. Certains des gaz, spécialement l'argon, diffusent lentement de l'intérieur de la Lune et peuvent apporter les indications sur les mécanismes en cours à l'intérieur de la Lune. Le vent solaire apporte

42. Par comparaison, un centimètre cube d'air à la surface de la Terre contient environ 25 millions de trillions d'atomes. En fait, le poids de toute la matière de l'atmosphère lunaire est de moins de 50 tonnes, et la totalité de l'atmosphère lunaire, si elle était gelée, pourrait être contenue dans un camion de déménagement. Par contraste, chaque module lunaire Apollo contenait 12 tonnes de carburant pour ses deux moteurs de fusée, et une grande partie de ce carburant était brûlée près de la surface lunaire pendant les alunissages ou les décollages. Chaque mission Apollo augmentait donc significativement l'atmosphère lunaire, peut-être aux environs de 10 à 20 pour cent. Les gaz rajoutés, essentiellement de la vapeur d'eau et de l'azote, purent être détectés pendant les décollages par les instruments installés sur la surface de la Lune.

Ces apports d'origine humaine à l'atmosphère lunaire sont probablement seulement temporaires. Les plus grandes molécules seront décomposées par le rayonnement solaire intense et les rayons ultraviolets, près de la surface lunaire, et les plus légers atomes et la vapeur d'eau seront vite perdus dans l'Espace.

un courant régulier d'atomes d'hydrogène, d'hélium, de carbone, d'azote et d'oxygène à la surface de la Lune, et, si les atomes réagissent chimiquement pour former des molécules gazeuses, de telles réactions apportent un autre matériau à l'atmosphère. Finalement, les impacts de météorite peuvent aussi fabriquer l'atmosphère lunaire, soit par vaporisation de roche lunaire, ou par dégagement de certains gaz extraterrestres contenus dans la météorite elle-même.

(page 207) Par ailleurs, une petite partie de l'atmosphère lunaire est sans doute produite à l'intérieur de la Lune. Une grande partie de l'élément argon de l'atmosphère lunaire se trouve sous la forme de l'isotope argon 40 et a probablement été produit par la désintégration du potassium 40 radioactif des roches de l'intérieur de la Lune. Ce gaz argon a trouvé lentement son chemin de l'intérieur de la Lune vers la surface, accompagné par de petites quantités de gaz radon produit par la désintégration d'autres éléments radioactifs (voir **pages 114-115**).

La quantité de gaz diffusant de l'intérieur de la Lune est trop petite pour permettre de penser qu'une quelconque activité volcanique intense ait lieu actuellement sur la Lune. Un possible indicateur de volcanisme est l'émission de vapeur d'eau, qui a été rapportée, détectée par les instruments de la surface de la Lune. La possibilité que l'eau soit émise à partir de l'étage du Module de Descente abandonné, ne peut pas être totalement exclue. Même si ces phénomènes de production d'eau sont naturels, ils sont inhabituels et la quantité de gaz impliquée est trop petite pour démontrer une activité volcanique majeure.

Il y a une plus forte probabilité que des gaz furent émis à partir de l'intérieur de la Lune dans le passé. Une certaine sorte de gaz fut clairement associée aux laves qui inondèrent les « mers » il y a environ 3 milliards et demi d'années, car nous trouvons souvent des bulles de gaz conservées dans des roches solides (photo 30). Il est improbable que ce gaz ait contenu de l'eau ; de l'eau n'a jamais été trouvée dans aucune des roches lunaires riches en bulles. De possibles candidats pour ces gaz sont l'hydrogène, le monoxyde de carbone, l'acide chlorhydrique, l'hydrogène sulfuré et autres gaz semblables habituels aussi dans les volcans terrestres.

Certaines des roches volcaniques lunaires récoltées lors des dernières missions Apollo contiennent des traces de matériaux volatils qui pourraient avoir été présents lors de leur éruption. Le spécimen 66095, aussi nommé « roche rouillée », récoltée par les astronautes d'Apollo 16, contient la seule fraction d'eau jamais détectée dans une roche lunaire. L'eau est liée à de petites quantités d'hydroxyde de fer rouge orange se présentant sous forme de rayures et d'enrobages dans le spécimen, **(page 208)** et rappelant beaucoup de la rouille terrestre. L'origine lunaire de cette rouille et l'eau qu'elle contient ne sont pas encore admises par tous, mais il est significatif que le spécimen soit aussi riche en d'autres éléments volatils comme le zinc et le chlore, qui pourraient avoir été présents avec l'eau dans un gaz volcanique lunaire. Le Sol Orange récolté par les astronautes d'Apollo 17 est aussi riche en zinc, chlore et autres éléments volatils, suggérant que le Sol Orange fit irruption sous forme d'une « fontaine de feu » riche en gaz, ou d'une fumerolle volcanique, sur la Lune.

Bien que des gaz venant de l'intérieur de la Lune puissent avoir eu un rôle important dans le lointain passé de la Lune, presque toute l'atmosphère lunaire actuelle est produite par le vent solaire qui, apparemment, apporte tout l'hydrogène, l'hélium et le néon détectés à la surface de la Lune, ainsi

qu'une grande partie de l'argon.

Quand ces atomes de vent solaire sont piégés dans le régolite, des réactions chimiques entre les atomes piégés et les minéraux du régolite produisent de petites quantités d'autres gaz, trouvés par les analyses du régolite. Ces réactions sont spécialement actives dans la couche superficielle du régolite, qui est chauffée au dessus du point d'ébullition de l'eau pendant le « jour » lunaire. Des atomes de carbone et d'hydrogène se combinent pour former le méthane (CH_4). Les atomes d'oxygène et le carbone réagissent pour produire du monoxyde de carbone (CO). Des atomes d'hydrogène du vent solaire réagissent avec des minéraux porteurs de soufre dans le régolite pour produire de l'hydrogène sulfuré (H_2S).

Des études montrent qu'une fois formées, ces molécules de gaz diffusent lentement en sortant du régolite vers la surface, où elles sont soit détruites soit s'échappent dans l'Espace. Les quantités de ces gaz sont petites, mais leur fuite à partir du régolite supprime des quantités détectables de carbone, d'oxygène et de soufre, produisant des changements légers mais détectables de la composition chimique du régolite.

Des apports à l'atmosphère lunaire par des impacts de météorites sont moins certains et probablement temporaires. Un petit (**page 209**) impact de météorite qui fait fondre un peu de régolite dégagera une quantité assez grande de gaz piégé venant du vent solaire, mais avec le temps ces gaz sont dispersés dans l'atmosphère lunaire, la teneur sera à peine détectable, et une grande partie du gaz dégagé sera probablement perdue en dehors de la Lune. Un impact plus grand de météorite qui vaporise plusieurs kilomètres cube de roche provoquera une atmosphère brève et chaude de vapeur de silice et d'autres éléments volatils, mais ce matériau se condense rapidement sur la surface lunaire et est incorporé dans le régolite.

Il a été suggéré que l'impact d'une très grosse météorite riche en éléments volatils ou une comète aurait libéré une grande quantité de gaz dans l'atmosphère lunaire ; une telle source extraterrestre a été proposée pour expliquer l'eau, le chlore et les autres éléments volatils dans la « Roche Rouillée » et dans le « Sol Orange ». A l'heure actuelle, aucun élément volatil de météorite bien déterminé et d'origine cométaire n'a été identifié dans des échantillons lunaires, et il semble improbable que de tels grands et peu fréquents impacts aient plus contribué à la formation de l'atmosphère lunaire que le flux continu de vent solaire.

En raison du vide poussé et des températures de « jour » élevées, l'atmosphère lunaire de jour peut contenir des vapeurs de nombreux éléments qui sont normalement solides sur Terre. Des échantillons de régolite collectés à partir d'endroits froids en permanence et ombragés sous de grands blocs de pierre semblent être enrichis en éléments tels que le plomb, le mercure, le brome, l'antimoine et d'autres éléments qui ont un point d'ébullition bas. Ces données suggèrent que de tels éléments volatils sont chassés par distillation en dehors du régolite par la chaleur solaire, et ensuite migrent vers les zones d'ombre froides où ils se condensent à nouveau pendant la « nuit » lunaire. Cette migration d'éléments pose un problème particulier dans le cas du plomb, qui peut être produit par désintégration radioactive et migre ensuite loin de ses éléments parents, rendant ainsi les déterminations d'âge des échantillons proches de la surface lunaire, très difficiles à interpréter. Un

autre aspect intéressant de ce mouvement d'atomes métalliques sur **(page 210)** la Lune, est la possibilité que des régions proches des pôles lunaires, qui ont été dans l'ombre permanente, puissent contenir des dépôts assez grands de métaux ou de minéraux simples formés par la condensation d'éléments volatils depuis des milliards d'années.

DE LA LUNE AUX ÉTOILES : LES TRACES DU SOLEIL

Avant les alunissages d'Apollo, une source importante d'information directe sur le Soleil était les météorites récemment tombées, dont on parlait parfois comme étant les « sondes spatiales du pauvre », car elles avaient été exposées aux rayons solaires pendant leur séjour dans l'Espace. Malheureusement, ce qu'enregistre une météorite est incomplet, car, pendant son passage fulgurant à travers l'atmosphère terrestre, la partie externe des météorites est brûlée et disparaît ; et avec cette couche superficielle s'en va la trace enregistrée produite par les particules solaires de basse énergie qui ne pénètrent pas profondément à l'intérieur de la matière solide.

Donc, les alunissages d'Apollo permirent aussi un grand bond en avant pour l'étude du Soleil. Non seulement nous avons pu récolter des échantillons de vent solaire pour analyser la matière venant du soleil aujourd'hui, mais chose plus importante, comme la lente érosion des roches solides sur la Lune change très peu le matériau de surface, les roches lunaires rapportées procurèrent un enregistrement beaucoup plus complet de l'histoire passée du Soleil que notre source météoritique précédente.

Presque immédiatement, les scientifiques apprirent à leur grand étonnement que le matériau éjecté du Soleil par les éruptions solaires intenses n'est pas le même que celui reflété par la composition générale du Soleil lui-même. Le rapport des atomes d'hydrogène et d'hélium dans les particules d'éruptions solaires tourne autour de 20 pour 1 environ, alors que le rapport de tels atomes dans le Soleil est d'environ 10 pour 1. Les mécanismes mal compris des éruptions solaires semblent favoriser l'éjection des atomes d'hydrogène plus légers hors du Soleil. **(page 211)** Cependant, les observations de traînées de particules d'éruption solaire gravées dans les lentilles des caméras de télévision de Surveyor 3 pendant ses 2 ans $\frac{1}{2}$ d'exposition sur la Lune apportaient une information quelque peu contradictoire. Ces études montraient que le rapport fer à hydrogène des éruptions solaires est 10 fois plus élevé que dans le Soleil lui-même, prouvant que les éruptions solaires dans ce cas éjecteraient de préférence les atomes de fer lourds plutôt que l'hydrogène léger. Clairement, la formation de l'éruption solaire est plus complexe que ce que nous pensions ; peut-être des éruptions solaires différentes ont-elles même des propriétés chimiques différentes.

Les échantillons lunaires permirent aussi de répondre à des questions concernant le fonctionnement passé du Soleil. Le Soleil était-il plus ou moins actif dans les temps anciens ? Les éruptions solaires ont-elles toujours existé, sont-elles un phénomène complètement récent qui préfigure quelque changement inattendu dans l'ensemble de l'environnement du Soleil ? Ce ne sont pas des questions futiles ; un changement de seulement 3 pour cent dans un sens ou dans l'autre concernant la quantité d'énergie expulsée par le Soleil pourrait rendre la Terre inhabitable. De plus petits changements dans le Soleil pourraient causer des changements climatiques sur la Terre suffisamment graves pour anéantir non seulement notre civilisation actuelle mais aussi notre survie en tant qu'espèce. Le fonctionnement présent et futur du Soleil est une question scientifique intrigante mais c'en est une

aussi dans laquelle chacun a un intérêt personnel.

Jusqu'ici les conclusions sont réconfortantes. Les traces laissées dans les échantillons lunaires montrent que le fonctionnement du Soleil a été presque de façon surprenante, constant pendant des périodes allant de milliers à des milliards d'années. Par exemple, la composition en atomes du vent solaire piégés dans le régolite ne montre aucun changement mesurable pendant environ un milliard d'années.

De façon similaire, des éruptions solaires semblent s'être produites depuis 100 000 années comme elles se produisent maintenant. Des éruptions solaires récentes ont laissé des traces dans de nombreux échantillons lunaires, et les effets de ces éruptions récentes fournissent un modèle important pour interpréter les plus anciennes traces enregistrées. Par exemple, une éruption solaire massive le 24 janvier 1971 produisit à la fois des réactions nucléaires et des traces de particules sur la partie supérieure d'un bloc de roche récolté près du sillon Hadley (**page 212**) par les astronautes d'Apollo 15 sept mois plus tard. Les effets furent localisés sur la face supérieure du caillou, montrant que le bloc de pierre n'avait pas bougé entre le moment de l'éruption et celui de la récolte.

Plusieurs sortes de preuves font penser à une régularité de la survenue des éruptions solaires dans le passé. La quantité d'argon 39 dans le régolite suggère l'occurrence uniforme d'éruptions solaires depuis au moins les 1 000 années passées. D'autres analyses montrent que le nombre et l'énergie des atomes d'hélium émis pendant les éruptions sont restés constants depuis 80 000 à 100 000 ans et que le rapport hydrogène sur hélium a été constant aux environs de 20 pour 1 pendant la même durée. Enfin, des études de traces de particules montrent que l'abondance d'atomes de fer dans les éruptions solaires, comparée au nombre d'atomes de fer dans les rayons cosmiques galactiques, a été constante depuis au moins 270 000 ans.

Si le Soleil semble s'être comporté avec régularité depuis les dernières 300 000 années environ, nous pouvons avoir quelque assurance que cela continuera de la même façon pendant au moins quelques siècles de plus. Mais il semble prématuré de supposer que le Soleil a toujours été dans le même état que maintenant. Certains spécimens de roches de continents lunaires et de minéraux contiennent de grands nombres inhabituels de traces de particules, et une explication possible est que le Soleil était beaucoup plus actif il y a 4 milliards d'années qu'il ne l'est maintenant. Cette question, comme tant d'autres, est encore sans réponse, mais cela serait passionnant si les roches lunaires qui aussi nous rassurent sur la stabilité actuelle du Soleil, pouvaient aussi montrer la trace enregistrée des premiers jours, plus violents, du Soleil.

L'apparente stabilité du Soleil semble assortie d'une stabilité semblable du reste de l'Univers, car les traces enregistrées des rayons cosmiques galactiques semblent aussi avoir été les mêmes pendant près du dernier milliard d'années. Des études faites sur des météorites et sur des échantillons lunaires ont montré que le rapport des atomes de fer et de calcium dans les rayons cosmiques est resté le même pendant cette période ; d'autres études montrent que l'abondance d'atomes d'hydrogène à haute énergie dans les rayons cosmiques galactiques n'a pas changé depuis au moins le dernier milliard d'années.

(**page 213**) D'une certaine manière, cette stabilité des rayons cosmiques est quelque peu

surprenante. La Voie Lactée, dans laquelle se trouve notre Soleil, a fait environ cinq révolutions complètes autour de son centre pendant les derniers milliards d'années, alors que notre soleil et les planètes foncent à travers la galaxie à environ 20 kilomètres par seconde. Pendant les derniers milliards d'années, le Soleil serait passé à travers de nombreuses régions différentes de la galaxie, et l'apparente stabilité des rayons cosmiques pendant tout ce temps est une importante découverte. Cela peut signifier que les rayons cosmiques sont produits par un mécanisme unique en n'importe quel endroit de la galaxie. Ou bien cela peut signifier que le Soleil a passé les derniers milliards d'années dans une partie de la galaxie où l'intensité des rayons cosmiques est très uniforme. Un des plus grands défis pour l'avenir est de lire dans les échantillons lunaires la trace complète de ces quelques atomes qui naquirent dans des étoiles lointaines et voyagèrent à travers l'Espace pendant des milliers d'années avant de finir leur périple sur la surface de la Lune.

UNE RECETTE POUR LA VIE

A tous égards, la plus mauvaise place pour rechercher l'origine de la vie se trouve sur une planète telle que la Terre où la vie prospère depuis des milliards d'années. Les composés chimiques originels nécessaires à la création de la vie ont été utilisés ou transformés en molécules plus compliquées à partir desquelles des animaux et des plantes actuels se sont formés. Les premiers êtres vivants élémentaires ont été remplacés par des descendants beaucoup plus complexes. Même l'atmosphère originelle a été modifiée par la vie, car l'oxygène que nous respirons est un sous-produit du métabolisme des plantes depuis des centaines de millions d'années.

Les missions Apollo, tout en démontrant sans aucun doute que la Lune est (et fut depuis toujours) dénuée de vie, nous donnèrent aussi la première opportunité pour l'étude d'une planète dont la nature originelle n'a jamais été modifiée par la vie. Il se pourrait bien que les réactions chimiques que nous avons détectées entre les atomes du vent solaire (**page 214**) et les particules de poussière lunaire reproduisent les premières étapes chimiques élémentaires ayant précédé la vie, bien que la Lune, stérile, fournisse un exemple d'un environnement où la vie elle-même ne puisse pas surgir.

Alors même qu'il est une source d'éléments chimiques utiles sur le plan biologique, le régolite est décevant. Le carbone, l'élément essentiel de la vie, est pratiquement absent. Le régolite contient moins de 200 parties par million (0,02 pour cent) de carbone. Les roches lunaires à partir desquelles s'est formé le régolite contiennent encore moins de carbone, et il semble clair que presque tout le carbone dans le régolite ne vient pas de la Lune mais a été apporté par le vent solaire et les météorites. De très infimes quantités de composés organiques⁴³ tels que le méthane (CH₄) et l'éthane (C₂H₆) totalisant moins d'une part par million ont été détectées, mais aucun « marqueur biologique » évoquant la vie (tels que alcanes ou acides aminés) n'ont été identifiés.

Il n'y a pas non plus d'éléments chimiques convenables dans le régolite pour entretenir la vie.

43. Le terme « organique » se rapporte aux éléments chimiques composés principalement de carbone et d'hydrogène qui constituent plantes et animaux vivants. Comme des composés organiques peuvent aussi être produits par des réactions chimiques en l'absence de toute forme de vie, comme dans le régolite, il est nécessaire de faire la distinction entre « composés organiques » et « composés biogéniques » produits par les métabolismes des êtres vivants. Aucun composé biogénique n'a été trouvé dans le régolite.

Même des plantes croissant dans du régolite rapporté sur Terre ont dû recevoir un apport de solutions nutritives ⁴⁴.

L'importance du régolite dans l'étude de l'origine de la vie est qu'elle apporte une démonstration pratique de la manière dont de simples molécules peuvent se former quand des atomes de vent solaire réagissent sur les surfaces de grains de poussière lunaire. Même avant le Programme Apollo, nous savions que certaines réactions de ce type devaient se produire dans l'espace interstellaire, car nos radiotélescopes ont détecté la présence d'un grand nombre de molécules élémentaires, (**page 215**) mais importantes sur le plan biologique, telles que l'eau, le formaldéhyde (H_2CO), l'acide cyanhydrique (HCN), et l'alcool éthylique ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) -qui se sont formées en quelque sorte dans les espaces glacés interstellaires. De telles molécules ne pourraient pas survivre aux températures régnant au sein des étoiles, mais elles se forment probablement quelque part dans l'Univers où des atomes d'hydrogène, de carbone, d'azote et d'oxygène peuvent réagir à des températures plus basses sur les surfaces de très fins grains de poussière interstellaire. Ces composés, formés en dehors d'organismes vivants, sont les « briques » de base de composés plus complexes comme les protéines et les acides aminés, sans lesquels la vie ne peut pas apparaître.

Des analyses de régolite ont détecté de nombreux composés élémentaires qui se sont formés apparemment par des réactions semblables entre les atomes de vent solaire et les minuscules fragments de cristaux et de verre du régolite. La plupart de ces composés sont inorganiques : monoxyde de carbone (CO), dioxyde de carbone (CO_2), hydrogène sulfuré (H_2S), dioxyde de soufre (SO_2). Les petites quantités de méthane organique (CH_4) et d'éthane (C_2H_6) qui ont été détectées se sont probablement formées par des réactions semblables.

Il y a un autre groupe de composés lunaires qui ont un intérêt particulier car ils peuvent apparemment réagir avec de l'eau pour former des acides aminés, matériau de base avec lequel se construisent les protéines. Ces « précurseurs d'acides aminés », comme on les a appelés, se présentent sous forme de quantités tellement minuscules (quelques parties par milliards) que leur nature et même leur existence font encore l'objet de discussions. Mais si ils sont présents dans le régolite, alors un pas critique vers l'origine de la vie pourrait être fait simplement en mettant en contact du régolite avec de l'eau.

De telles molécules se forment par un simple mécanisme qui peut se produire partout dans l'Univers. Les surfaces de très fines particules de poussière dans le régolite agissent comme des catalyseurs sur lesquels des atomes du vent solaire se combinent pour produire des molécules simples, pendant que la chaleur du Soleil fournit l'énergie nécessaire à la réaction. Ce processus a aussi été reproduit en laboratoire en bombardant des échantillons de régolite avec les atomes (**page 216**) d'éléments simples. L'enveloppe amorphe produite sur les particules de poussière par le bombardement de vent solaire (voir p. **193**) donne apparemment une surface hautement active où les réactions chimiques peuvent se faire rapidement. Les mêmes réactions produites en laboratoire et sur

44. Les premiers rapports concernant des capacités de croissance de certaines plantes terrestres dans le régolite n'ont pas été confirmés par les expériences suivantes. Presque tout ce qui est nécessaire à une plante pour pousser (eau, composés organiques, potassium, etc.) a dû être ajouté au régolite pour faire grandir un tant soit peu les plantes.

la surface lunaire peuvent aussi se réaliser sur de très fins grains de poussière dans l'espace interstellaire.

Il y a loin de la production de molécules simples jusqu'à celle de la vie, mais ces molécules élémentaires représentent un pas critique vers l'avant. Si les réactions dans le régolite *sont* les premiers pas vers la vie, alors la recette pour obtenir la vie est simple, et les ingrédients sont répandus à travers l'Univers.

L'évolution sur la Lune ne pouvait pas se poursuivre au delà des substances élémentaires, car, si des molécules organiques plus complexes arrivaient à se former, elles seraient vite détruites par l'environnement rude de la surface de la Lune. Mais le fait que de telles réactions chimiques primitives mais importantes puissent se produire même dans l'environnement destructeur de la surface lunaire, suggère qu'elles puissent se produire aussi presque partout. Dans un environnement comme celui de la Terre, protégé par une atmosphère et nourri par de l'eau, les molécules primitives furent capables de survivre pour en former de plus complexes, formant des structures de plus en plus compliquées, jusqu'à ce que quelque chose émergea, que nous, leurs descendants, appellerons la vie. L'abîme entre la Lune morte et la Terre vivante peut ne pas être aussi vaste que ce que nous le pensions autrefois.

CHAPITRE 10

L'INTÉRIEUR DE LA LUNE : CARTOGRAPHIE GRÂCE AUX ÉCHOS

Pour comprendre toute planète, il nous faut apprendre à connaître son intérieur, car le caractère de base d'une planète n'est pas déterminé par sa surface. Les processus géologiques majeurs qui modifient la Terre, volcans, séismes, champ magnétique et dérive des continents sont tous régis par des forces venues de sa profondeur.

Même nos mines et nos puits de pétrole les plus profonds ne s'enfoncent pas à plus de quelques kilomètres dans les couches les plus externes de la Terre. Dix kilomètres seulement sous nos pieds, les pressions atteignent des milliers d'atmosphère⁴⁵ et les températures grimpent à des centaines de degrés centigrade, conditions qui interdisent une exploration directe par l'Homme.

Comme nous ne pouvons pas explorer directement (**page 218**) l'intérieur de la Terre, nous devons compter sur les données acquises à partir de sa surface. Des géologues ont parfois pu obtenir des échantillons de l'intérieur en profitant des processus géologiques qui font remonter des morceaux de l'intérieur jusqu'à la surface. La formation de grandes chaînes de montagnes comme les Alpes ou les Appalaches, suivie de millions d'années d'érosion, expose en fin de compte des masses de roches formées à des profondeurs de 20 à 30 kilomètres. Des laves fondues, qui peuvent se former à des profondeurs de 150 à 200 kilomètres, arrachent souvent des morceaux de roche solide qui les entourent et les transportent vers la surface à travers les volcans en éruption.

Ces masses éparpillées et ces fragments de roche peuvent nous en dire beaucoup sur la croûte superficielle de la Terre, mais rien sur la partie intérieure plus profonde.

La plus grande part de notre connaissance sur l'intérieur profond de notre planète vient des instruments sensibles, à la surface, qui enregistrent les infimes effets produits par les processus majeurs internes de la Terre. Depuis le dernier siècle (ndt : livre écrit au 20^e siècle), des scientifiques ont étudié la répartition variable des masses rocheuses de l'intérieur de la Terre en mesurant de petites fluctuations de la force de gravité de place en place. La détection des ondes sismiques générées par des tremblements de terre profonds a aidé à identifier les matériaux qui constituent l'intérieur de la Terre. Des mesures de la chaleur diffusant en dehors de la Terre nous ont aidés à comprendre l'origine de l'activité volcanique. Et nous savons maintenant que le champ magnétique puissant de la surface de la Terre est l'élément détectable des processus mal compris se produisant dans son noyau même.

L'utilisation des mesures de surface pour déchiffrer l'intérieur de la Terre a été une part cruciale de

45. Une atmosphère est la pression exercée par l'atmosphère de la Terre au niveau de la mer. Elle est égale à environ un kilogramme par centimètre carré. La pression à l'intérieur de la Terre, qui est produite par le poids de la roche sous-jacente, augmente d'environ 300 atmosphères par kilomètre de profondeur.

l'exploration de notre planète natale. Bien que de nouvelles découvertes continueront à se présenter et que de nouvelles théories se feront jour pour les expliquer, le canevas de l'intérieur de la Terre semble maintenant assez bien établi.

La Terre n'est pas un objet uniforme, homogène : son intérieur est constitué de plusieurs couches différentes. La couche la plus superficielle, qui nous est la plus familière, est appelée la croûte ; elle (**page 219**) est composée de roches relativement légères comme le granit et le basalte. (A l'échelle de la planète entière, les couches superficielles de roches sédimentaires comme le calcaire et le schiste sont d'une finesse insignifiante). L'épaisseur de la croûte varie. Sous les continents, où elle est composée de granit et de roches similaires, elle peut être épaisse de 30 à 40 kilomètres, alors que sous les bassins océaniques, la croûte est composée largement de basalte et est épaisse d'environ 5 kilomètres.

Sous la croûte se trouve une transition nette avec les roches plus lourdes qui forment le manteau de la Terre⁴⁶. Le manteau est plus riche en fer et en magnésium que la croûte et est composé principalement de pyroxène et d'olivine. Sur près de 3 000 kilomètres d'épaisseur, le manteau s'étend de la partie profonde de la croûte à la surface du noyau de la Terre. A ce niveau, environ 2 900 kilomètres sous la surface, se trouve une autre frontière fondamentale ; les roches silicatées du manteau laissent la place au matériau métallique plus dense qui constitue le noyau terrestre.

La partie la plus profonde de la Terre est un noyau métallique sphérique de 6 000 kilomètres de diamètre environ, près de la moitié du diamètre de la Terre elle-même. Les données obtenues à partir des séismes et des modèles chimiques de la Terre suggèrent que le noyau est principalement du fer métallique, probablement allié à 10 – 15 pour cent d'un élément plus léger tel que le silicium ou le soufre. La partie extérieure du noyau est à l'état fondu, et il est probable que les mouvements dans cette partie superficielle du noyau soient à l'origine du champ magnétique terrestre. Le noyau central est solide, résultat des pressions terrifiantes (près de un million d'atmosphères) qui existent à ces profondeurs.

Pendant ces quelques dernières années, les géologues ont élaboré une (**page 220**) théorie générale qui explique les modèles de l'activité volcanique terrestre et des séismes, et aide à comprendre les forces qui les produisent. Suivant cette théorie, qui est connue soit comme la « tectonique des plaques », soit comme la « dérive des continents » ou comme « l'épanchement du fond océanique », la partie externe de la surface de la Terre se compose de 20 à 30 plaques qui se déplacent au rythme d'environ quelques centimètres par an, transportant continents et océans avec elles. Une plaque typique peut avoir des milliers de kilomètres de large mais seulement 75 à 100 kilomètres d'épaisseur.

Les groupements géographiques de séismes et d'éruptions volcaniques montrent qu'ils sont

46. La frontière entre la croûte terrestre et le manteau s'appelle la « discontinuité de Mohorovicic » (généralement nommée « Moho » pour abrégé) d'après le scientifique yougoslave qui découvrit celle-ci en 1909 en étudiant la propagation des ondes sismiques. Le Moho est une frontière fondamentale dans la Terre ; les roches situées de part et d'autre ont une composition chimique significativement différente, de même que leur composition minérale et leurs propriétés physiques. Le Moho est à 50 — 60 kilomètres de profondeur sous les continents, mais seulement à 5 kilomètres environ de profondeur sous les océans.

concentrés à la frontière entre ces plaques, à l'endroit où les plaques sont soit en train de se séparer soit en train d'entrer en collision les unes avec les autres. Quand deux plaques s'éloignent, comme au niveau de la dorsale médio-atlantique, du matériau neuf fondu monte à partir du manteau terrestre, et des masses de lave s'ajoutent sur les bords des plaques. Des collisions entre plaques, il résulte une activité sismique majeure et une surrection de hautes montagnes. Les Andes s'élèvent et produisent des volcans actifs car la plaque de l'Océan Pacifique est poussée lentement en se dirigeant sous le continent Sud Américain. L'Himalaya est le résultat d'une collision encore active entre la plaque qui porte l'Inde et la plus grande plaque Eurasienne où se trouve la Chine. La grande cicatrice de la Faille de San Andreas et les séismes désastreux de Californie sont produits alors que la plaque Pacifique glisse vers le Nord le long de la berge ouest du continent Nord Américain.

La façon dont se produisent les mouvements des plaques nous est beaucoup plus connue que la cause qui génère le mouvement même de ces plaques. Nous savons que sous les plaques solides se trouve de la roche molle et en partie fondue, qui se situe entre 75 et 250 kilomètres sous la surface. A ce niveau, pas aussi éloigné de la surface que New York ne l'est de Philadelphie, la température avoisine 1 500 °C, et la pression approche 30 000 fois celle qui règne à la surface de la Terre. Cette zone molle forme une sorte de couche de lubrifiant sur laquelle glissent les plaques et dans laquelle (page 221) la lave fondue se prépare à approvisionner les volcans de surface. Cependant, la nature des forces qui tirent les plaques reste peu comprise. Les plaques peuvent être dirigées par des mouvements de matériau dans la partie la plus profonde du manteau sous la zone de faible résistance. Une autre explication possible est avancée : lorsque le bord d'une plaque commence à s'enfoncer sous une autre, la force de gravité continue à tirer le reste de la plaque en subduction vers le bas. Il y a une variété de théories selon lesquelles des plaques sont poussées, tirées ou portées à distance, et la nature des forces qui provoquent ces mouvements est un des problèmes non résolus sur le fonctionnement de la Terre.

Un siècle d'étude, cependant, a réussi à déchiffrer la nature de l'intérieur de la Terre et à permettre de comprendre la particularité élémentaire de la Terre. La Terre, avons nous appris, est une planète chaude, active et dotée d'un champ magnétique puissant. Une activité sismique et volcanique continue se poursuit sur ses 200 kilomètres les plus externes. Depuis que la planète s'est formée, sa surface a été continuellement remodelée ; les bassins océaniques, qui couvrent maintenant 71 pour cent de sa surface, n'existaient pas il y a 200 millions d'années quand l'épisode actuel de la tectonique des plaques débuta.

Grâce à notre nouvelle connaissance de l'intérieur de la Terre, et aux instruments qui nous aidèrent à l'acquérir, nous étions prêts à explorer l'intérieur d'un second corps planétaire ; et en même temps que le Programme Apollo nous donnait accès à la surface lunaire, l'exploration de l'intérieur de la Lune commençait.

SÉISMES LUNAIRES : LE POULS DE LA LUNE

L'énergie interne de la Terre (ou de toute autre planète) se manifeste à la surface de différentes manières. Une grande partie de cette énergie atteint la surface soit par le flux centrifuge stable de chaleur, soit par les éruptions plus irrégulières de lave fondue sortant des volcans. Cependant, une

partie importante (**page 222**) de l'énergie terrestre est emmagasinée lentement dans des roches sous tension à l'intérieur de la Terre, et ensuite relâchée brusquement et de façon imprévisible sous forme de séismes.

Les lentes mais irrésistibles collisions des plaques en mouvement modèlent la surface de la Terre sous l'effet de grandes masses de roche qui se courbent et se déforment en son sein. « L'énergie de contrainte » se développe lentement dans ces masses de roche déformées, exactement comme elle le fait dans une branche d'arbre se courbant sous le poids d'un enfant qui se balance. La tension peut s'accumuler pendant des décennies ou des siècles, mais finalement la masse rocheuse atteint un point de rupture ; elle se rompt, et l'énergie emmagasinée est relâchée sous forme de violents mouvements qui se propagent à travers la Terre.

De telles ruptures soudaines se produisent souvent de façon répétée le long de grandes fractures appelées failles dans la croûte terrestre. Certaines d'entre elles, comme la faille de San Andreas bien connue, en Californie, peuvent s'étendre sur des centaines de kilomètres. A proximité de la faille, le sol peut bouger brusquement sur plusieurs mètres de largeur, provoquant une destruction totale des immeubles, voies de chemin de fer et autoroutes. A une plus grande distance de la faille, le mouvement du sol décroît, mais l'onde produite par un grand séisme peut être encore détectée par des instruments sensibles à des milliers de kilomètres de distance.

La quantité d'énergie libérée par un séisme dépend du volume de roche sous tension impliqué. Au point de rupture, chaque mètre cube de roche près de la faille a accumulé environ autant d'énergie que celle libérée par un petit pétard. Mais un grand séisme peut étendre ses effets sur des millions de kilomètres cube de la croûte terrestre, libérant une énergie totale équivalente à l'explosion de nombreuses bombes à hydrogène.

Les conséquences catastrophiques des séismes sont bien connues. Plus de 830 000 personnes furent tuées lors d'un séisme à Shen-Shu, en Chine, en 1556 ⁴⁷, et le séisme de San Francisco de (**page 223**) 1906, qui ne tua que 500 personnes, reste très présent dans nos esprits encore actuellement à cause du risque d'un futur séisme désastreux le long de la faille encore active de San Andreas. Mais ces événements destructeurs ont aussi procuré aux scientifiques un outil essentiel pour faire une cartographie de l'intérieur de la Terre. Le développement d'instruments appelés sismographes, qui peuvent détecter des mouvements du sol aussi petits qu'un millionième de millimètre a rendu possible l'enregistrement et l'analyse d'ondes sismiques même après qu'elles aient voyagé sur des milliers de kilomètres à travers l'intérieur de la Terre. En enregistrant les ondes sismiques, les scientifiques peuvent déterminer le lieu et la profondeur du séisme, la quantité d'énergie libérée ⁴⁸ et la nature des

47. Une répétition récente de ce désastre se produisit le 28 juillet 1976, quand deux séismes majeurs frappèrent la région de Pékin. Le chiffre des victimes n'a pas été fourni par la République Populaire de Chine, mais il fut évalué à au moins cent mille et peut-être un demi million de personnes tuées. Les témoignages donnés par les visiteurs étrangers rapportent que les villes de Pékin, Tangshan et Tientsin (population totale de plus de huit millions) furent sévèrement endommagées.

48. Les énergies des séismes sont habituellement mesurées sur l'échelle de magnitude de Richter, d'après le nom du sismologue américain qui l'a inventée. L'équation de base est :

roches à travers lesquelles les ondes sismiques ont voyagé. En examinant des dizaines de milliers d'enregistrements de séismes, récoltés depuis près d'un siècle, les scientifiques ont lentement construit l'image actuelle de l'intérieur de la Terre.

(page 224) L'analyse des séismes lunaires fut une des quelques méthodes utilisées pour fournir une information détaillée de la structure interne de la Lune et de la présence possible soit d'une activité volcanique intense soit de mouvements de plaques. Les sismographes lunaires furent les produits les plus modernes de décennies de développement instrumental. Sur la Lune, ils pouvaient mesurer des mouvements de 1/10 millionièmes de millimètre, détectant de minuscules séismes sur la face cachée de la Lune. Des ordinateurs furent utilisés pour analyser le flot des données rapportées, donnant en quelques secondes des résultats qui, autrefois, auraient demandé des jours pour être obtenus. Et comme rien n'était connu sur l'intérieur de la Lune avant que les premiers sismographes ne soient installés sur la surface, tout résultat représentait un pas en avant majeur.

Le premier sismographe lunaire, installé sur la Lune par les astronautes d'Apollo 11 pendant la première marche lunaire humaine fonctionna pendant 21 jours⁴⁹ et ne détecta que quelques séismes. Les résultats apprirent aux scientifiques que l'intérieur de la Lune était beaucoup plus calme que celui de la Terre. Un sismographe semblable sur la Terre aurait enregistré environ 300 séismes pendant la même période de 21 jours.

$$\log E = 5,8 + 2,4 M$$

où $\log E$ est le logarithme de l'énergie du séisme en ergs et M est la magnitude sur l'échelle de Richter. Une augmentation de la magnitude de 1 unité correspond à une augmentation de l'énergie libérée d'environ 250 fois.

Un sismographe sensible peut détecter des séismes de magnitude d'environ $M = 1$. L'énergie d'un tel très petit séisme est approximativement équivalente à celle libérée par un petit pétard, et le mouvement de sol en résultant serait indécélable pour un être humain. Environ 800 000 petits séismes naturels d'environ $M = 2$ à 3,4, qui passeraient inaperçus par des êtres humains, sont détectés chaque année. Des séismes de plus grandes magnitudes ($M = 3,5$ à 4,5) peuvent être perçus par des témoins humains. De sérieux dommages commencent à environ $M = 5,5$ et des séismes avec des magnitudes supérieures à $M = 8$ provoquent habituellement une destruction totale dans les alentours immédiats. Par exemple, le séisme de San Fernando, en Californie, de 1971, avait une magnitude 6,6, celui de San Francisco de 1906 avait une magnitude de 8,25 et celui d'Alaska de 1964 de 8,6, une des plus grandes jamais mesurées. Aucun séisme de magnitude 9 n'a jamais été enregistré.

49. Le sismographe d'Apollo 11 fut construit pour fonctionner comme un instrument isolé, indépendant. Il était donc équipé de panneaux solaires qui convertissaient la lumière du Soleil en électricité, et la production d'énergie ne survécut pas à la première nuit lunaire. Des sismographes suivants furent tous intégrés à un groupe d'instruments scientifiques (appelé ALSEP, pour Apollo Lunar Surface Experiment Package, (ndt : Bloc d'Instruments pour l'Expérimentation sur la Surface Lunaire du Programme Apollo), ensemble commandé par une unité centrale qui produisait de l'électricité à partir de la chaleur radioactive d'une petite quantité de plutonium. Ces derniers sismographes, installés lors des missions Apollo 12, 14, 15 et 16, ont fonctionné merveilleusement bien et pendant des périodes excédant de loin celles prévues de un ou deux ans. Le sismographe d'Apollo 12 a fonctionné continuellement jusqu'au mois de novembre 1969. Le réseau complet de quatre sismographes qui rend possible une détection et une localisation plus précise des séismes, est opérationnel depuis avril 1972.

Les sismographes sur la Lune détectèrent plusieurs sortes différentes d'événements lunaires. Ils enregistrèrent des séismes nés profondément dans la Lune. Ils détectèrent aussi des tremblements produits par les impacts de petites météorites sur la surface lunaire. **(page 225)** Comme l'intérieur de la Lune est assez calme, et comme les météorites heurtent la Lune privée d'atmosphère à leur vitesse cosmique d'origine, l'impact d'une météorite, pesant plus de 10 kilogrammes (environ la taille d'un gros pamplemousse) et percutant n'importe quelle partie de la Lune, peut être détecté. Environ 100 impacts de cette sorte sont enregistrés chaque année. Heureusement, les impacts de météorites et les séismes lunaires produisent des enregistrements légèrement différents, si bien qu'il est possible de les différencier.

Cependant, la détection simple d'un séisme lunaire est seulement le premier pas. Pour utiliser les données afin de comprendre l'intérieur de la Lune, nous devons déterminer quand et où s'est produit le séisme, et quelle quantité d'énergie il a libéré. Même sur la Terre, où il y a des centaines de sismographes en fonctionnement, cette information est parfois difficile à obtenir à partir des enregistrements de séismes. Sur la Lune, en utilisant seulement quelques instruments, les difficultés sont nettement plus redoutables, et le déchiffrement de la structure interne de la Lune aurait été un processus long et ardu si nous avions été limités aux événements lunaires naturels.

Heureusement, il y avait un moyen de produire des séismes artificiels bien contrôlés sur la Lune. Le système du vaisseau spatial Apollo consistait en plusieurs parties, ou étages, qui s'écrasaient sur la Lune dès qu'ils n'étaient plus utiles. Ces écrasements produisaient des séismes lunaires artificiels dont les localisations, les horaires et les énergies étaient connus avec tellement de précision que les enregistrements de sismographes de ces événements pouvaient être utilisés comme des références pour interpréter les enregistrements des séismes lunaires et des impacts de météorites.

Les deux parties du système du vaisseau spatial Apollo, disponibles pour provoquer des séismes lunaires artificiels, étaient le Module Lunaire qui se posait sur la Lune, et le troisième étage des séries de fusées qui lançaient le vaisseau spatial Apollo à partir de la Terre. (Les plus grands premier et second étages retombaient sur Terre après épuisement de leur réserve de carburant.) Le troisième étage, appelé S4B, portait le vaisseau spatial en orbite autour de la Terre et était ensuite utilisé pour le propulser vers la Lune.

(page 226) Ces impacts artificiels furent assez grands pour envoyer des échos à travers la totalité de l'intérieur de la Lune. Un étage S4B pèse environ 14 tonnes et circule à environ 2,5 kilomètres par seconde quand il percute la Lune ; l'écrasement libère environ autant d'énergie que 45 tonnes de TNT. Le Module Lunaire, plus petit, pesant seulement 2,3 tonnes, s'écrase à environ 1,7 kilomètre par seconde, libérant une énergie d'environ 3 tonnes de TNT. Les sismographes lunaires détectaient facilement ces impacts, même à des distances de plus de 100 kilomètres.

Le 20 novembre 1969, le sismographe d'Apollo 12 nouvellement installé détecta le premier séisme lunaire artificiel alors que le Module Lunaire d'Apollo 12, abandonné, s'écrasait sur la Lune près de son site d'alunissage originel dans l'Océan des Tempêtes. Alors que l'enregistrement de cet impact apparaissait sur les instruments à Terre, il y eut une surprise soudaine parmi les scientifiques qui observaient, car l'enregistrement était entièrement différent de n'importe quel séisme terrestre.

Le premier signe de l'impact était une impulsion pointue enregistrée par le sismographe. Sur Terre, cette vibration se serait terminée au bout de quelques secondes ou minutes seulement, lorsque l'onde sismique est progressivement absorbée par la croûte terrestre. Mais au lieu de s'éteindre, le signal lunaire continuait de s'inscrire en forme de crescendo avant de s'affaiblir lentement (figure H). « La Lune sonnait comme une cloche » dit un scientifique, et elle continua à résonner pendant plus de deux heures.

Au fur et à mesure que d'autres enregistrements étaient obtenus, les scientifiques commençaient à voir pourquoi la Lune se comportait si étrangement. Ils conclurent que les quelques kilomètres de la couche superficielle de la Lune doivent être constitués de roche brisée et fracassée qui permet aux signaux de se répéter en aller et retour pendant des heures. Par ailleurs, cette zone superficielle doit être complètement sèche, car la moindre quantité d'eau aurait absorbé les signaux très rapidement, comme cela se produit dans les sols humides et les roches terrestres chargées d'eau.

Pendant le déroulement du Programme Apollo, neuf impacts artificiels de ce genre furent provoqués sur la Lune. Les données qu'ils procurèrent, permirent de vérifier le fonctionnement des sismographes lunaires, (**page 227**) afin d'interpréter les séismes lunaires naturels avec plus de précision et de réaliser une cartographie de l'intérieur de la Lune. Dans de rares cas, on a pu faire un bon usage scientifique d'une machine abandonnée.

La mesure des séismes lunaires internes naturels mit aussi en évidence les différences fondamentales entre la Terre et la Lune. Comparé à la Terre, l'intérieur de la Lune est calme et inerte. La Lune n'a aucun « bruit de fond » qui est produit ici par des tremblements de terre mineurs, les éruptions volcaniques, le ressac de l'océan ou les camions passant sur les autoroutes proches. La Lune est tellement calme que les sismographes pouvaient fonctionner avec leur sensibilité maximum, détectant de minuscules (**page 228**) séismes qui seraient passés inaperçus sur la Terre. Faire fonctionner un sismographe sur la Lune, c'est comme si un instrument à New York pouvait détecter un marteau de forgeron frappant une roche à Philadelphie.

#####

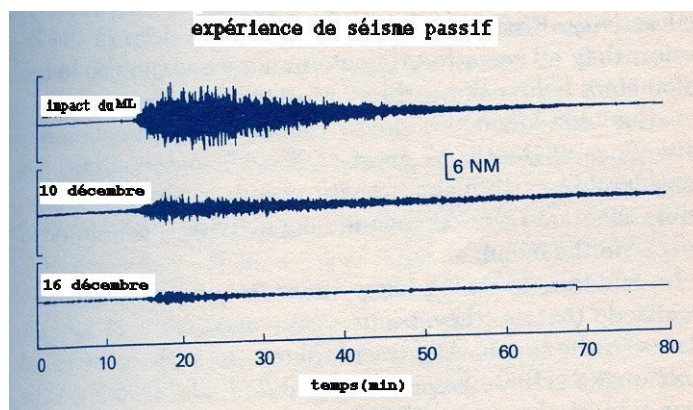


Figure H (**page 227**). Un séisme lunaire inscrit sa signature. Les signatures de trois séismes lunaires séparés

apparaissent sur ces enregistrements obtenus avec les sismographes d'Apollo 12 à la fin de l'année 1969. Le temps (en minutes) est inscrit horizontalement. Les trois signaux commencent sur le côté gauche de l'enregistrement, forment un pic, et ensuite diminuent progressivement pendant une période de plus d'une heure. L'échelle verticale à droite, notée « 6 nm », indique l'amplitude du signal de sismographe produite par un mouvement du sol de seulement 1/10 millionièmes d'inch.* (Diagramme publié avec la permission de G. V. Latham et G. Simmons, dans « On the Moon with Apollo 15 » de G. Simmons, NASA Educational Publication, (Washington, D.C. : 1971) US Government Printing Office). :

***ndt** : 1inch=25,4mm=25.400micromètre=25.400.000nanomètre. 1/10.000.000d'inch=2,54nanomètres,assez loin des 6nm du graphique. En fait, French donne un ordre de grandeur.

Même à leur maximum de sensibilité, les sismographes lunaires ne détectent qu'environ 3 000 séismes lunaires par an, presque tous en dessous de la magnitude 2. La Terre génère environ 800 000 séismes de cette intensité chaque année. L'énergie totale libérée par les séismes lunaires est environ le 1/million de millionième de celle libérée par les séismes terrestres, et un modeste feu d'artifice de 4 juillet (Independance Day) libère plus d'énergie en une seule soirée que celle libérée par la Lune pendant toute une année.

Les enregistrements de milliers de séismes lunaires ont permis d'établir les schémas de base de l'activité interne de la Lune. Tout d'abord, les séismes lunaires se produisent à une grande profondeur ; ils semblent tous avoir leur origine dans une zone comprise entre 600 et 800 kilomètres sous la surface. La plupart des séismes sur la Terre se produisent à moins de 200 kilomètres sous la surface, et seuls quelques uns prennent naissance à des profondeurs égales à 600 kilomètres. Donc notre activité sismique considérable se produit à de faibles profondeurs, alors que l'activité sismique lunaire beaucoup plus faible se concentre plus profondément dans la Lune.

En plus de leur origine profonde, la plupart des séismes lunaires sont aussi localisés ; c'est à dire qu'ils se reproduisent en des endroits précis de la Lune. Actuellement, environ 40 « centres » d'activité sismique ont été identifiés, tous sauf un sur la face visible de la Lune. Les centres ne sont pas répartis au hasard. A part quelques rares exceptions, ils se situent le long de deux grandes ceintures de 100 à 300 kilomètres de large et s'étirant sur environ 2 000 kilomètres autour de la Lune. Ces centres et les ceintures qu'ils composent, peuvent être des régions où l'intérieur de la Lune est lentement mais continuellement en train de se déformer. Il pourrait y avoir des fractures actives à l'intérieur de la Lune au niveau de ces points, peut-être associées à de petites quantités de roche fondue.

Une autre caractéristique des séismes lunaires est leur rythme : ils se produisent à intervalles réguliers. Sur la Terre, les séismes semblent (**page 229**) se produire au hasard du temps, mais sur la Lune, des concentrations de séismes sont détectées environ tous les 14 jours, une période qui correspond grossièrement à la moitié du temps qu'il faut à la Lune pour faire une fois le tour de la Terre. Des études plus détaillées ont montré que les centres de séisme lunaire produisent une succession de tremblements tous les 28 jours environ, ou une fois par mois lunaire. Près de la moitié des centres sont actifs quand la Lune est à un point de son orbite autour de la Terre, et les autres centres deviennent actifs quand la Lune atteint le point opposé de son orbite, environ deux semaines

plus tard. La combinaison de ces deux cycles de 28 jours produit un cycle de 14 jours de l'activité sismique lunaire pour l'ensemble de la Lune.

La régularité des séismes chaque fois que la Lune atteint certains points de son orbite autour de la Terre suggère que l'activité sismique lunaire est déclenchée par les forces de marée générées dans la Lune par la gravité terrestre. Les effets des marées produits sur la Terre par la Lune sont bien connus ; des marées visibles de plusieurs mètres sont produites dans les océans terrestres, et de plus petites marées, mais encore mesurables, sont produites dans les roches terrestres (voir pp. **51-52**). La gravité plus importante de la Terre provoque des forces de marée sur la Lune qui ont six fois l'importance de celles produites par la Lune sur la Terre. De telles forces de marée ne sont pas assez puissantes pour briser la roche solide de l'intérieur de la Lune, mais elles peuvent ajouter assez de tension sur des roches déjà cassées à l'intérieur de la Lune pour les faire bouger, provoquant un séisme lunaire, comme « la goutte d'eau qui fait déborder le vase ».

La découverte concernant le rapport entre les séismes lunaires et les marées peut être importante pour comprendre notre propre planète. Il a été aussi suggéré, bien que jamais prouvé, que les tremblements de terre sont déclenchés de la même manière par les forces de marée. Une étude ultérieure de la Lune nous aidera à comprendre le mécanisme de déclenchement dû aux marées afin de pouvoir déterminer quelle importance il a sur la Terre.

Cependant tous les séismes lunaires ne sont pas réguliers ou en rapport avec les marées. Les sismographes lunaires ont aussi détecté une autre sorte de séisme lunaire qui se produit par groupes à des moments apparemment sans rythme fixe, (**page 230**) et apparemment sans rapport avec les mouvements de la Lune autour de la Terre. Ces séismes lunaires sont semblables aux groupes de séismes terrestres, petits et superficiels, qui accompagnent souvent l'éruption des laves volcaniques sur la Terre. Ce type de séisme lunaire mal compris peut être lié aux mouvements de roche encore en fusion à l'intérieur de la Lune.

STRUCTURE INTERNE : LES DIFFÉRENTES COUCHES DE LA LUNE

Les études faites grâce aux missions Apollo ont fermement établi la nature fondamentale de l'intérieur de la Lune. La Lune n'est pas un corps uniforme ; il est constitué d'une série de couches qui, d'une certaine façon ressemblent à celles de la Terre. (Figure I) Les sismographes lunaires, aidés par les impacts artificiels, nous ont fourni une image assez bonne de l'intérieur de la Lune jusqu'à des profondeurs de quelques centaines de kilomètres. En dessous de ce niveau, l'image que nous en avons devient moins claire, car les données dépendent de séismes lunaires incertains et d'impacts de météorites imprévisibles. La nature de la partie profonde de l'intérieur lunaire, à partir d'environ 1 000 kilomètres jusqu'au centre de la Lune, à une profondeur de 1 738 kilomètres, est presque inconnue. Le débat est encore ouvert sur l'existence ou non d'un petit noyau métallique.

La partie externe de la Lune est mieux connue dans la région qui se trouve autour de l'Océan des Tempêtes, où les quatre sismographes d'Apollo 12, 14, 15 et 16 ont été installés. Là, immédiatement en dessous de la fine couche de régolite, se trouve une zone de roche brisée et fendue d'un kilomètre d'épaisseur environ. Cette zone de socle rocheux écrasé est probablement le résultat d'un processus de fracture profonde dû aux grands impacts de météorites, et c'est cette couche brisée qui est

responsable en grande partie des réverbérations inhabituelles des échos de séisme lunaire.

Sous ce matériau brisé se trouve une couche plus épaisse de roche plus compacte qui s'étend en profondeur sur environ 25 kilomètres. Comme les propriétés de cette roche sont très semblables à (page 232) celles des échantillons de basalte récoltés dans l'Océan des Tempêtes, l'on pense que cette couche est une réserve du type des coulées de basalte qui remplit les bassins de « mers » dans cette partie de la Lune.

Sous cette couche de basalte se trouve une couche de matériau dont les propriétés ressemblent à celles des gabbros riches en feldspath et aux anorthosites trouvés dans les « continents » lunaires. Cette couche, d'environ 35 kilomètres d'épaisseur, s'étend jusqu'à une profondeur d'environ 60 kilomètres. Cette couche est probablement la croûte lunaire qui est à la base des bassins de « mer » et de leur comblement de basalte.

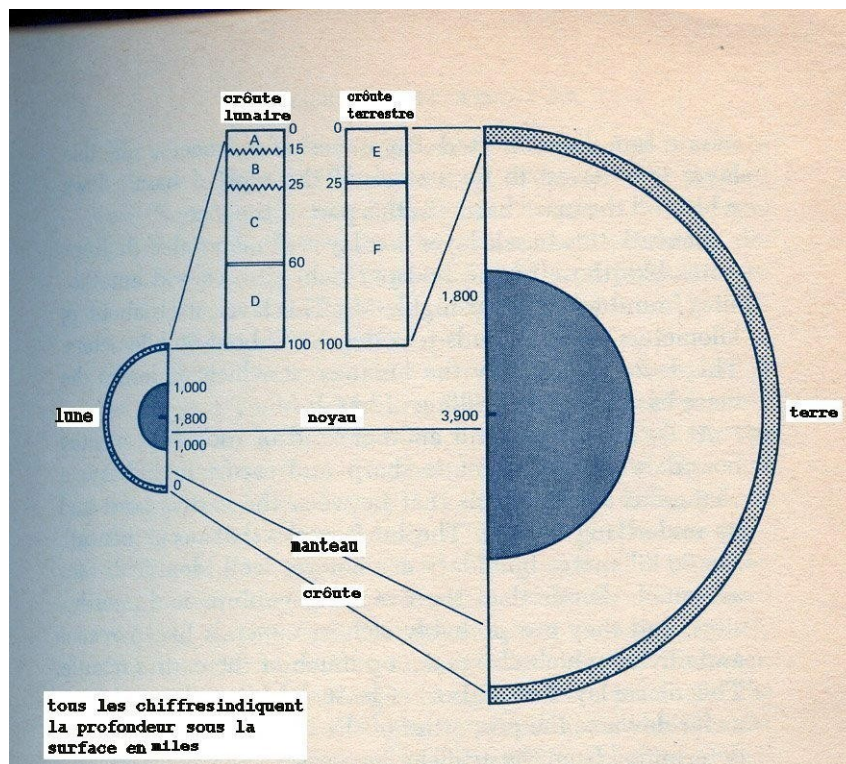


Figure 1 (page 231). L'intérieur de la Terre et de la Lune. L'intérieur de la Lune, comme elle fut déchiffrée dans la région entourant l'Océan des Tempêtes (où nos instruments avaient été placés) est comparé à l'intérieur de la Terre. La couche supérieure de la Lune (la croûte) semble plus épaisse et plus rigide que la croûte de la Terre, et la nature du matériau sous la croûte lunaire n'est pas encore bien connue. Il n'est pas non plus encore clair quant à savoir si la Lune a un petit noyau de fer ; au contraire, le noyau de fer de la Terre est aussi grand que la Lune entière.

Sur ce diagramme, la Terre et la Lune sont dessinées à l'échelle, avec la Lune représentée comme le quart de la taille de la Terre. Terre et Lune sont toutes deux composées de 3 couches : l'une extérieure, fine, la *croûte*, une interne le *manteau*, et une plus interne le *noyau*. (l'existence d'un noyau dans la Lune n'est pas encore certain). Les différentes

unités dont sont faites les croûtes terrestre et lunaire sont montrées agrandies dans les colonnes du dessus. La croûte lunaire comporte (1) une couche externe de roches écrasées et cassées sur 1600 mètres d'épaisseur; (2) une couche de roche basaltique d'environ 40 kilomètres d'épaisseur, (3) une couche de roche riche en feldspath d'environ 56 kilomètres d'épaisseur. La Terre, au contraire, a une croûte de roches mélangées granitiques et basaltiques d'environ 40 kilomètres d'épaisseur. Sur la Terre comme sur la Lune, la croûte externe recouvre une couche de roches plus denses formant le manteau.

A 60 kilomètres, une autre sorte de roche apparaît encore ; la frontière à ce niveau est nette et semble indiquer un changement aussi significatif que celui qui se trouve entre la croûte terrestre et son manteau sous-jacent. Les roches lunaires qui se trouvent sous la frontière des 60 kilomètres ne sont pas encore bien identifiées ; elles sont beaucoup plus denses que les gabbros et les anorthosites situés au dessus, et elles sont probablement riches en minéraux tels que le pyroxène et l'olivine qui, aussi, constituent une grande partie du manteau terrestre. Cette couche dense s'étend jusqu'à au moins 150 kilomètres, qui est la limite extrême jusqu'où les propriétés de l'intérieur lunaire ont été déterminées grâce aux impacts artificiels.

En dessous de 150 kilomètres, l'intérieur lunaire, quelle que soit sa composition, semble dur et rigide jusqu'à des profondeurs de 600 à 800 kilomètres, où l'existence de séismes lunaires montre qu'une activité, peut-être accompagnée de phénomènes volcaniques, y subsiste encore.

La nature de la partie centrale de la Lune fut en partie révélée par l'impact providentiel d'une météorite d'une tonne qui frappa la face cachée de la Lune le 17 juillet 1972. Les vibrations dues à cet impact traversèrent le centre de la Lune avant d'être détectées par les sismographes de la face visible. Alors que les ondes traversaient le centre, elles furent altérées à peu près de la même manière que le sont les ondes sismiques terrestres quand elles traversent des zones de roches partiellement fondues à l'intérieur de la Terre. Ceci suggère qu'il y a une zone à 1 000 ou 2 000 kilomètres de profondeur dans la Lune où les températures peuvent être suffisamment élevées pour que les roches soient partiellement fondues.

(page 233) La question de l'éventualité de la présence d'un noyau central de fer dans la Lune semblable à celui de la Terre reste encore sans réponse. Les données actuelles ne prouvent pas qu'il en existe un, mais un petit noyau métallique de 1 000 à 1 500 kilomètres de diamètre pourrait exister sans avoir été détecté. Un tel noyau serait beaucoup plus petit en proportion que le noyau terrestre et ne représenterait qu'environ un vingtième du volume de la Lune.

La composition d'un tel noyau est également incertaine. Un noyau de fer pur ne pourrait pas être beaucoup plus grand que 1 000 kilomètres de diamètre sans produire un effet détectable sur les mouvements orbitaux de la Lune. Par ailleurs, en raison du point de fusion élevé du fer (1 535 °C), il serait difficile à la fois pour un tel noyau de se former et de rester fondu. Si le noyau contenait une certaine quantité de sulfure de fer (FeS) mélangé au fer, le point de fusion serait considérablement abaissé (aux environs de 1 000 °C) ; dans ce cas, la Lune pourrait contenir un noyau métallique partiellement fondu d'environ 1 400 kilomètres de diamètre. Un tel noyau serait assez grand pour

avoir produit le champ magnétique détecté dans les échantillons lunaires rapportés. A l'heure actuelle, cependant, l'intérieur lunaire profond, avec ou sans noyau, est encore pour une grande part inexploré. Nous pouvons seulement souhaiter quelques impacts météoritiques de plus aux bons emplacements, avec de la chance, pour aider à résoudre les problèmes en suspens.

Malgré toutes les données récoltées par les sismographes, la structure interne de la Lune n'a été explorée que dans une petite région sur la face visible de la Lune (ou faisant face à la terre). Une des questions les plus fondamentales à propos de la Lune reste encore en grande partie sans réponse : des différences majeures existent-elles entre les structures internes des régions de la face visible et de la face cachée de la Lune ?

Des différences de surface évidentes entre les deux faces de la Lune ont été observées depuis que les premières photographies de la face cachée furent obtenues par les vaisseaux spatiaux automatiques au début des années 1960. De grands cratères d'impact, et d'encore plus grands bassins circulaires existent sur les deux faces de la Lune, en nombres égaux, mais les coulées de basalte qui forment les « mers » sombres se trouvent (**page 234**) presque exclusivement sur la face visible. Sur la face cachée, se trouvent seulement quelques flaques éparpillées de matériau de « mer » sombre, dont l'une d'entre elles remplit le saisissant cratère Tsiolkovsky (photo 31). Comme les laves de « mer » prirent naissance profondément dans la Lune avant de monter vers la surface, la répartition inégale des laves sur la surface de la Lune suggère l'existence de différences majeures entre les deux faces dans la constitution de leurs parties intérieures.

Comme le Programme Apollo fut limité à des alunissages sur la face visible de la Lune, des instruments de surface n'ont jamais été installés sur la face cachée. Cependant, les expériences scientifiques en orbite lunaire apportèrent des indications sur l'intérieur de la Lune par des mesures soigneuses de ses formes et par des relevés des variations de sa force d'attraction gravitationnelle. Certaines des données les plus utiles vinrent de l'altimètre à laser, un dispositif qui utilise un rayon laser pour mesurer les différences d'altitude du relief avec une précision d'un mètre (voir p. 111).

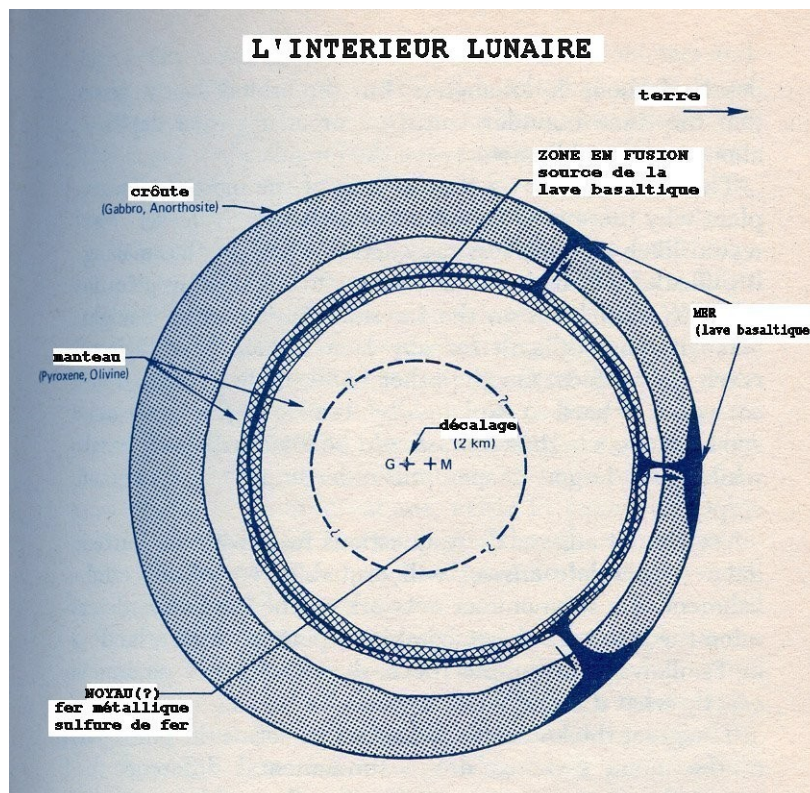


Figure J (page 235). Une coupe à travers la Lune. La structure interne de la Lune, telle qu'elle a été trouvée par le Programme Apollo, est montrée sur cette coupe. Le diamètre de la Lune est d'environ 3 500 kilomètres et les différentes couches ne sont pas dessinées à l'échelle. La croûte extérieure (pointillée) est plus épaisse sur la face cachée de la Lune (environ 100 kilomètres) qu'elle ne l'est sur la face visible (environ 60 kilomètres). Cette croûte est riche en calcium et aluminium et est composée de roches telles que gabbro et anorthosite. Sous la croûte se trouve un manteau (blanc) plus dense, riche en magnésium et probablement composé essentiellement de pyroxène et d'olivine. Un petit noyau riche en fer (limité par des tirets) pourrait exister au centre de la Lune. Le centre de gravité de la Lune (M) est décalé d'environ deux kilomètres en direction de la terre par rapport à son centre géométrique (G). Les « mers » (noires) sur la face visible sont remplies de basalte qui s'est formé dans une zone profonde de fusion à l'intérieur du manteau lunaire et est monté vers la surface (flèches).

Les données de l'altimètre à laser, confirmèrent avec une bien plus grande précision, l'observation faite avant Apollo que la Lune n'est pas tout à fait une sphère parfaite. (Figure J). Elle est très légèrement elliptique, avec une plus grande dimension d'environ 2 kilomètres supérieure à son diamètre moyen de 3 476 kilomètres. Le plus long diamètre pointe vers la terre.

L'altimètre à laser montra aussi que la masse interne de la Lune n'a pas une répartition uniforme. Le centre de gravité lunaire ne correspond pas à son centre géométrique ; il en est éloigné d'environ 2 kilomètres à nouveau dans la direction de la terre (voir Figure J). Ces distorsions de la forme de la Lune en direction de la terre peuvent avoir pour origine les fortes marées du temps où la Lune était jeune et beaucoup plus proche de la terre. Les renflements peuvent aussi permettre à la gravité

terrestre de maintenir la Lune de telle manière qu'elle garde sa face visible tournée toujours vers la terre.

Ces différences dans l'intérieur de la Lune laissent aussi supposer que la croûte lunaire sous les continents de la face cachée doivent être plus épais que sur la face visible. Sur la face visible, la frontière entre la croûte lunaire et les roches plus denses situées en dessous se situe à une **(page 236)** profondeur d'environ 60 kilomètres, mais les données recueillies en orbite suggèrent que la même frontière doit se trouver à une plus grande profondeur, environ 75 à 100 kilomètres, sur la face cachée.

La croûte plus épaisse sur la face cachée de la Lune pourrait expliquer pourquoi il y a si peu de lave sur cette face. Une croûte plus épaisse contiendrait probablement moins d'éléments radioactifs, la rendant moins apte à chauffer l'intérieur lunaire jusqu'au point de fusion et à former des laves sur la face cachée. Par ailleurs, il serait plus difficile pour les laves formées en dessous d'atteindre la surface. Mais par contre, si ces théories sont correctes, il est difficile d'expliquer pourquoi Tsiolkovsky, un cratère n'ayant que 200 kilomètres de diamètre, aurait été rempli de basalte de « mer » alors que de beaucoup plus grands, plus profonds et plus anciens bassins d'impact restent vides.

Nous ne pouvons pas répondre parfaitement à ces questions avec nos données actuelles. Une réponse complète demandera probablement l'installation d'un réseau de sismographes sur la face cachée pour en déterminer la structure, en l'associant peut-être à un alunissage dans Tsiolkovsky pour échantillonner le matériau sombre et déterminer exactement ce qu'il est et quand il s'est formé.

La grande épaisseur de la roche compacte qui forme la partie externe de la Lune montre une différence fondamentale entre la Lune et la terre. Sur la terre, de la roche fragile et partiellement fondue forme une couche d'environ 75 à 250 kilomètres d'épaisseur seulement. La roche qui constitue la Lune est compacte jusqu'à une profondeur d'au moins 600 à 800 kilomètres. La partie supérieure de la Lune est trop froide et rigide pour développer un système de plaques de croûte mobiles comme celles de la terre, et les modes actuels de déformation des deux planètes sont totalement différents.

S'il y a un tant soit peu de roche fondue à l'intérieur de la Lune, elle doit se trouver sous la partie épaisse externe, dans et sous la zone de séismes lunaires. Il y a certaines preuves que de petites quantités de matériau fondu existent à des profondeurs d'environ 1 000 à 1 400 kilomètres à l'intérieur de la Lune. Les mesures de flux thermique de surface et des calculs basés sur les propriétés électriques de roches lunaires suggèrent que les températures internes de la Lune pourraient atteindre **(page 237)** 600 à 800 °C à des profondeurs d'environ 200 kilomètres et pourraient atteindre les points de fusion du basalte et d'autres roches lunaires (environ 1 200 °C) à des profondeurs d'environ 1 000 kilomètres. C'est justement là où se sont produits des séismes lunaires isolés, et les modifications des ondes sismiques lunaires, qu'a été montré l'existence d'un peu de roche fondue.

L'existence de roche fondue dans la profondeur de la Lune peut expliquer les curieux « phénomènes transitoires lunaires » qui ont été signalés par des astronomes depuis des centaines d'années. Sir William Herschel (1738-1822) signalait avoir observé des lueurs rouges brillantes sur la Lune en 1783 et 1787 et suggérait qu'elles correspondaient à des éruptions volcaniques lunaires.

Ultérieurement, des observateurs ont signalé environ 1 200 « phénomènes », tels que lueurs, brumes légères, changements brefs de couleur et obscurcissements temporaires de formations lunaires de surface. Beaucoup de ces observations, faites récemment par des observateurs soigneux, sont convaincantes, bien qu'aucune explication logique n'ait été encore proposée, et qu'aucun phénomène transitoire n'ait été observé par les astronautes.

Les phénomènes transitoires semblent limités à certains endroits de la Lune. Certains cratères ont été le siège de nombreux phénomènes ; environ 300 ont été signalés sur le cratère Aristarque, 75 sur Platon et 25 sur Alphonse, sans oublier la détection par Kozyrev en 1958 d'une possible émission de gaz lunaire (voir p. 61). D'autres phénomènes transitoires semblent être concentrés autour des bords de « mers », les mêmes régions dans lesquelles la détection de radon émis de l'intérieur lunaire a été aussi signalée (voir pp. 114-115).

La cause des phénomènes lunaires transitoires est encore inconnue. Des éruptions volcaniques récentes sont difficiles à concilier avec les âges anciens de toutes les laves lunaires. D'autres explications, comme des nuages de poussière lunaire d'origine électrique, ou la fluorescence d'une faible atmosphère lunaire sous l'effet des radiations solaires, sont difficiles à prouver. L'existence possible de roche fondue dans la profondeur de la Lune rend plus facile de soutenir que les phénomènes transitoires sont dus à de petites quantités de gaz volcanique, ou de mélange de poussière et de gaz montant vers la surface à travers des fractures de la croûte. **(page 238)** Si cette hypothèse est correcte, alors de futures observations pourraient montrer une relation étroite entre les phénomènes transitoires et le rythme des séismes lunaires, et les phénomènes transitoires seraient alors la conséquence visible de la déformation interne de la Lune.

Un alunissage et le retour d'un échantillon de quelque lieu actif comme Aristarque peuvent être nécessaires pour établir l'origine de ces phénomènes transitoires. Ils pourraient éventuellement nous apporter la preuve que l'intérieur, en profondeur, de la Lune est chaud et partiellement fondu. Jusqu'à ce qu'ils soient expliqués, ils nous rappellent que si la Lune est froide et calme depuis 3 milliards d'années, elle peut ne pas être complètement morte.

MAGNÉTISME : OÙ UNE BOUSSOLE LUNAIRE S'ORIENTE-T-ELLE ?

Explorateurs et autres voyageurs savent depuis des centaines d'années que la Terre a un champ magnétique puissant qui fait s'orienter les aiguilles de boussoles vers le Nord. A une époque plus récente, les propriétés magnétiques de la Terre ont été utilisées pour la navigation, pour la prospection des gisements de métaux, pour la datation des roches et des objets de fabrication humaine et pour confirmer la lente dérive des continents.

Notre capacité à mettre en application le magnétisme terrestre a devancé largement notre compréhension de son origine. En 1600, Sir William Gilbert (1540-1603) suggérait que le champ magnétique existait car la Terre entière se comportait comme un aimant ⁵⁰. Cependant des découvertes

50. Un aimant permanent est une pièce de métal qui produit un champ magnétique car ses atomes sont tous alignés dans la même direction. Les aimants habituels domestiques ou de laboratoire, faits d'alliages de fer, nickel ou cobalt sont des aimants permanents. Un champ magnétique peut aussi être produit par le passage de particules chargées à travers un conducteur. Les électroaimants sont fabriqués en faisant passer un courant électrique dans des bobines de fil de cuivre ;

plus récentes sur la **(page 239)** Terre montrèrent que son intérieur était trop chaud pour qu'un quelconque matériau agisse comme un aimant permanent. Suivant de plus récentes théories, l'intérieur de la Terre est une sorte d'électroaimant ou de dynamo, dans laquelle le noyau métallique de la Terre joue un rôle essentiel.

La formation du noyau de la Terre et le développement conséquent de son champ magnétique furent un événement majeur dans l'histoire de la Terre. Au moment de la formation de la Terre, plus d'un tiers de son poids était constitué par du fer. Dans la Terre originelle, ce fer peut avoir été éparpillé à travers toute la planète, mais apparemment la Terre devint bientôt assez chaude pour fondre. Cette fusion fut suffisamment forte pour transformer le fer en gouttes de métal fondu qui lentement s'écoulèrent à travers les roches moins denses pour former un noyau central. Ce processus mal compris d'échauffement et de séparation fut si efficace qu'il forma un noyau de fer de près de la moitié du diamètre et d'un huitième du volume de la Terre elle-même.

Autant que nous puissions en dire (et nous ne pouvons pas le dire très bien), le champ magnétique terrestre est produit par des courants électriques qui circulent à travers le noyau de la Terre comme ils le font à travers un générateur ou un électroaimant. Une explication plus détaillée a été difficile à donner. En tout état de cause, nous savons très peu de choses sur les propriétés physiques, chimiques et magnétiques des métaux solides et liquides du noyau, où les températures atteignent plusieurs milliers de degrés centigrade et les pressions, des centaines de milliers d'atmosphères.

Un autre problème qui se pose pour arriver à une explication est l'étrange comportement du champ magnétique lui-même. Les pôles magnétiques glissent lentement à la surface de la Terre et chaque million d'années environ, le champ magnétique s'inverse brusquement, si bien qu'une aiguille de boussole se dirigera vers le Sud au lieu du Nord. La dernière inversion, d'une période « inverse » à **(page 240)** notre période « normale » actuelle, a eu lieu il y a 700 000 ans seulement, alors que vivaient quelques uns des ancêtres directs de l'Homme. Ces inversions, dont on a pu remonter le cours sur plusieurs centaines de millions d'années, ont apporté un nouvel outil important pour déterminer les âges des roches, mais elles sont difficiles à concilier avec des théories modernes sur l'origine du champ magnétique lui-même.

La découverte d'un champ magnétique autour d'une planète est donc une clé importante de son histoire et de sa structure interne, car elle suppose la présence d'un noyau de fer qui a fondu et s'est séparé à l'intérieur de la planète pendant une période ancienne d'échauffement intense. Depuis qu'un champ magnétique peut être détecté à une distance significative en faisant passer une sonde spatiale transportant des détecteurs sensibles, nous ne sommes plus obligés de nous poser sur une planète pour déterminer son magnétisme. Durant la dernière décennie, des vaisseaux spatiaux automatiques mesurèrent les champs magnétiques de quatre autres planètes. Les sondes ont fourni une grande diversité de résultats, mais peu logiques, concernant le magnétisme planétaire.

Mars, une planète ayant environ la moitié de la taille de la Terre, n'a pas de champ détectable.

dans ces aimants, le champ magnétique n'existe que lorsque le courant passe. Un champ magnétique peut aussi être produit par des particules chargées circulant dans le vide ; un champ magnétique faible mais détectable est produit par les atomes chargés du vent solaire.

Cependant, Mercure, qui est encore plus petite que Mars, a un champ magnétique bien déterminé qui fut détecté par le survol de Mariner 10 en mars 1974. Le champ de Mercure est d'environ 200 gammas⁵¹, pas même un pour cent du champ de la Terre, mais suffisamment important pour prouver que la planète a un noyau de fer significatif. Vénus, une plus grande planète, souvent décrite comme la « jumelle de la Terre » n'a pas du tout de champ magnétique détectable. Parmi les planètes étudiées jusqu'à maintenant, Jupiter a le plus fort champ magnétique. **(page 241)** Des mesures rapprochées réalisées par le survol de Pioneer 10, en décembre 1973, montre que le champ magnétique de Jupiter est 10 à 15 fois plus puissant que celui de la Terre. Cet intense champ magnétique pourrait avoir un rapport, en quelque sorte, avec les émissions de « bruit » d'onde radio qui ont été détectés en provenance de Jupiter depuis de nombreuses années.

Avant les alunissages d'Apollo, on pensait généralement que la Lune avait soit un très faible champ magnétique soit n'en avait pas du tout. Les vaisseaux spatiaux automatiques avaient détecté des champs de quelques gammas seulement près de la Lune, et encore ce champ faible était-il probablement associé au vent solaire. La Lune, semblait-il, n'avait pas de noyau de fer et pas de champ magnétique.

Une des surprises majeures révélées par le Programme Apollo fut de découvrir que la Lune avait apparemment possédé un assez puissant champ magnétique pendant une certaine période du passé. La preuve venait des propriétés magnétiques des roches lunaires rapportées, des mesures faites par les astronautes à la surface de la Lune et des instruments des petits satellites en orbite autour de la Lune.

Le fort magnétisme inattendu des roches lunaires fut observé pour la première fois dans les échantillons d'Apollo 11, et a été observé dans des échantillons des missions suivantes. Le magnétisme est le caractère stable, rémanent qui se manifeste dans les laves terrestres et autres roches quand elles se refroidissent dans le champ magnétique terrestre. Ces observations montrent qu'un champ magnétique puissant avait existé sur la Lune quand les différentes laves et brèches s'étaient refroidies il y a 4,2 à 3,2 milliards d'années. Le champ magnétique de la Lune avait été gravé sur les très fines particules de fer métallique dans les roches en cours de refroidissement.

Des études soigneuses montrèrent que ce magnétisme rémanent s'était formé sur la Lune et n'était pas le résultat de l'exposition des échantillons au vaisseau spatial ou au champ magnétique de la Terre. Pour vérifier complètement cette possibilité, un échantillon de basalte d'Apollo 12 (échantillon 12002) fut complètement démagnétisé sur Terre et renvoyé ensuite sur la Lune lors de la mission Apollo 16 pour voir quel magnétisme il pourrait acquérir pendant le **(page 242)** voyage d'aller et retour. Bien que l'échantillon récupéra un faible magnétisme, rien du magnétisme rémanent plus élevé ne fut détecté au retour sur Terre de l'échantillon lorsqu'il fut mesuré à nouveau.

51. L'unité de base pour la mesure de l'intensité d'un champ magnétique est le oersted (oe) d'après le nom du physicien danois Hans Christian Oersted (1777-1851), qui découvrit l'électromagnétisme. Le champ magnétique de la Terre est d'environ 0,6 oersted aux pôles et d'environ 0,3 oersted à l'équateur. Un aimant de laboratoire peut produire des champs beaucoup plus puissants, 10 000 oersteds et plus. Les champs magnétiques naturels sont mesurés par convention avec une plus petite unité, le « gamma », qui équivaut à un cent millième d'oersted. Le champ magnétique terrestre, qui est assez intense dans la gamme des champs magnétiques planétaires, est de 30 000 à 60 000 gammas.

De plus, le fait que les astronautes puissent réellement mesurer des champs magnétiques significatifs sur la surface lunaire elle-même était une preuve formelle que le magnétisme était strictement d'origine lunaire. Sur le site d'alunissage d'Apollo 12 dans l'Océan des Tempêtes, une valeur de 38 gammas fut mesurée, et une valeur plus basse de 6 gammas fut mesurée par les astronautes d'Apollo 15 dans le sillon Hadley. Ces valeurs plus basses semblent typiques des régions de « mers », alors que le magnétisme plus puissant était trouvé sur les sites de « continents ». Sur Fra Mauro (Apollo 14) des champs locaux de 43 et 103 gammas furent mesurés. Des valeurs plus élevées furent même trouvées sur Descartes (Apollo 16) ; un champ de 121 gammas fut mesuré sur la vire, et le champ de 313 gammas enregistré à North Ray Crater fut le plus puissant mesuré sur la surface lunaire. Ces champs magnétiques élevés semblent être liés à la Formation Cayley, un des ensembles de brèches découverts sur le site d'Apollo 16.

Les mesures faites par les astronautes montrèrent que des champs magnétiques locaux significatifs sont liés à des roches formant la surface lunaire. Cette conclusion fut confortée par des mesures magnétiques faites à partir des satellites en orbite lunaire. Pendant les deux missions Apollo 15 et 16, des petits satellites lancés à partir du Module de Commande mesurèrent le champ magnétique autour de la Lune pendant les mois qui suivirent le retour des astronautes sur Terre. Un troisième satellite, Explorer 35, acquit des données supplémentaires sur son orbite allongée autour de la Lune. Alors que Explorer 35 était, à l'origine, lancé pour étudier les effets du champ magnétique terrestre sur le vent solaire, il apporta d'inattendues et importantes contributions à la cartographie des champs magnétiques sur la Lune elle-même.

Ces mesures par satellites rendirent possible la construction d'une carte du magnétisme assez complète qui montrait des étendues de magnétisme puissant et orienté diversement, de la taille de dizaines à des **(page 243)** centaines de kilomètres. La surface de la Lune semble être composée de blocs diversement magnétisés ; il n'y a pas, sur la Lune un seul pôle magnétique Nord ou Sud.

En général, les « mers » sur la face visible de la Lune ont un magnétisme plus bas que les « continents », moins de 50 gammas, et plus uniforme. Les étendues de continents, spécialement ceux de la face cachée, montrent de plus puissants champs magnétiques, même si ceux-ci sont inégaux et variables, et qui ont souvent plus de 300 gammas. Une forte anomalie magnétique se présente juste au nord du cratère Van De Graff sur la face cachée. Van De Graff est une zone exceptionnelle à d'autres égards aussi : elle forme une dépression d'environ quatre kilomètres de profondeur sur la face cachée de la Lune pourtant élevée, et elle montre aussi une radioactivité légèrement plus élevée que les régions environnantes. Cette anomalie pourrait révéler de la roche volcanique ensevelie sous la région ; en tout cas cela indique que Van De Graff est un endroit qui mérite une étude ultérieure.

La preuve est apportée par les échantillons, les astronautes et les satellites qu'un champ magnétique significatif doit avoir existé sur la Lune il y a environ 4,2 à 3,2 milliards d'années. Il est possible d'estimer l'intensité de cet ancien champ lunaire à partir du magnétisme restant maintenant dans les échantillons lunaires, mais les procédures sont incertaines et compliquées. Des évaluations du champ lunaire varient d'environ 1 000 gammas (quelques pour cent du champ terrestre) à 120 000 gammas (environ deux fois la valeur du champ terrestre actuel). Évidemment, personne n'est sûr de l'intensité

que peut avoir eu le champ lunaire ou s'il a pu beaucoup varier dans le passé.

La preuve du magnétisme ancien sur la Lune est probablement le résultat le plus curieux de tout le Programme Apollo. Il a été à l'origine d'une quantité d'explications possibles, aucune d'entre elles n'étant très satisfaisante. Peut-être que la suggestion la plus logique est que la Lune, comme la Terre, avait un noyau métallique qui produisait un champ magnétique et puis, d'une manière ou d'une autre s'est éteint, au cours des 3 derniers milliards d'années. Mais il n'est pas facile d'expliquer comment ce noyau pouvait produire un champ magnétique puissant pendant plus d'un milliard d'années et cesser (**page 244**) de fonctionner. Un grand objet comme la Lune perd de la chaleur interne uniquement par la conduction lente à travers son épaisseur. Si la Lune avait un noyau fondu magnétique il y a 3 milliards et demi d'années, le noyau serait encore fondu et la Lune aurait encore un champ magnétique. Si l'intérieur lunaire profond est encore chaud, comme l'indique un grand nombre de nos preuves, alors l'absence d'un champ magnétique lunaire est encore plus difficile à expliquer.

Une autre explication est que le magnétisme lunaire fut acquis à partir du champ magnétique terrestre au temps où la Lune était beaucoup plus proche de la Terre, peut-être proche de 20 000 kilomètres. Mais bien que la Lune puisse avoir été aussi proche de la Terre sitôt après s'être formée, il semble impossible que la Terre puisse l'avoir gardée aussi près pendant la durée (plus d'un milliard d'années) requise pour magnétiser à la fois les anciennes et les jeunes roches lunaires. Des explications plus exotiques faisant intervenir des champs magnétiques puissants inhabituels dans le Soleil ou le vent solaire amènent le même problème. Il n'y a pas de preuve que de tels champs anormaux aient jamais existé, et il est difficile de trouver un mécanisme qui aurait fourni de tels champs pendant un milliard d'années ou plus, après que le Soleil se soit apparemment stabilisé dans sa configuration actuelle avec un fonctionnement « normal ».

Au fond, nous n'en savons pas encore assez pour comprendre d'où est venu le magnétisme lunaire. Nous ne savons pas encore si les basaltes lunaires contenant du fer ont des propriétés magnétiques différentes des roches terrestres sans fer avec lesquelles nous sommes plus familiers. Nous ne savons pas si, ou comment, les propriétés magnétiques des roches de la surface lunaire pourraient avoir été altérées par les ondes de choc produites par un impact de météorite ou par le bombardement de particules atomiques à haute énergie venues du Soleil. Nous ne comprenons même pas assez bien la création du champ magnétique terrestre pour interpréter ce que peut nous apprendre le magnétisme lunaire à propos de notre propre planète. La boussole lunaire est dirigée vers le passé, mais nous ne sommes pas encore assez expérimentés pour lire les directions indiquées.

CHAPITRE 11

LA LUNE ET AU DELÀ

Pendant des siècles précédant le Programme Apollo, nous observions la Lune comme si nous observions un étranger allant et venant devant notre maison. Maintenant nous sommes sortis à la rencontre de l'étranger. La Lune est devenue une connaissance (photo 32), et elle nous a maintenant révélé une bonne partie de sa propre histoire.

La découverte du passé de la Lune est probablement le plus grand succès scientifique du Programme Apollo, car nous avons maintenant les archives d'un autre monde pour les comparer à l'histoire de notre propre planète.

Les traces intactes de l'histoire de la Lune sont plus anciennes que les nôtres (voir tableau 2). Les roches lunaires nous apprennent que la Lune devint un objet isolé il y a environ 4,6 milliards d'années au cours de la formation de l'ensemble du système solaire. Comme les autres planètes, la Lune est probablement une accumulation de nombreux corps plus petits qui se sont rassemblés pour devenir un seul grand corps.

Au début, la Lune était un monde fondu et bombardé de toutes parts. La formation de la Lune par l'accrétion de petits objets, libéra (**page 247**) tellement d'énergie que la partie superficielle de la Lune fut complètement fondue sur une profondeur de plusieurs centaines de kilomètres. Certains minéraux se séparèrent ensuite de cet océan lunaire de roche fondue, produisant les différences chimiques révélées par la géologie lunaire actuelle. Alors que la Lune se solidifiait lentement, des collisions continues avec de grands corps brisèrent ses anciennes roches et creusèrent de cratères la surface des continents lunaires. Ce bombardement intense prit fin il y a environ 4 milliards d'années par une série d'énormes impacts qui creusèrent les grands bassins de « mer » tels que Mare Imbrium et Mare Orientale.

Puis, le réchauffement radioactif interne commença à faire fondre à nouveau la Lune, cette fois-ci sur une épaisseur relativement faible, entre 100 et 250 kilomètres sous la surface, provoquant de grandes éruptions de lave qui s'étalèrent sur les mers lunaires pendant plus d'un demi milliard d'années entre moins 3,8 et 3,1 milliards d'années. Après la dernière de ces éruptions à moins 3 milliards d'années environ, la Lune devint calme. Des impacts de météorites ont sculpté sa surface, élaborant la couche de régolite et formant parfois de grands cratères comme Copernic et Tycho. A l'exception des vibrations de séismes lunaires et des phénomènes transitoires (voir p. 237) encore inexpliqués, la Lune est maintenant inactive.

Tableau 2 (**page 246**). *Les histoires de la Terre et de la Lune*. Ce tableau des temps résume les

grandes différences des histoires de la Terre et de la Lune. La Lune conserve la trace de l'histoire de ses premiers événements et ne montre pratiquement aucune activité ayant moins de trois milliards d'années d'ancienneté. Au contraire, l'histoire primitive de la Terre n'est plus visible, et la majeure partie des

événements terrestres est relativement récente, incluant le développement de la vie dans les océans, l'apparition des mammifères terrestres et la naissance de l'humanité.

LUNE	MILLIONS D'ANNÉES		TERRE
Formation —	4 600		— Formation
Fusion intense, continents formés, impacts répétés probables —	4 400		
Plus anciennes roches retrouvées —	4 200		
Grands impacts —	4 000 à 3 800		
		3 750	— Plus anciennes roches retrouvées (granit du Groenland)
Remplissage des mers par des coulées de lave —	3 700 à 3 300	3 400	— Les plus vieilles roches volcaniques, les plus anciennes traces de vie, trace des océans
		2 600	— Âge maximum des plus vieilles roches
Volcanisme le plus récent (?) —	2 100		
		2 000	— Deux grands cratères d'impact (30-60 km de diamètre)
Cratère Copernic formé par un impact —	1 000		
		600	— Développement des premiers organismes vivants
Cratère Tycho formé par un impact —	300	300	— Animaux terrestres et plantes
		200	— Début de la séparation des continents
		100	— Dinosauriens
		50	— Formation des Montagnes Rocheuses ; mammifères
		3	— L'Homme

Malgré le flot d'informations chimiques et historiques obtenues par le Programme Apollo, nous n'avons pas encore de théorie unique, universellement acceptée, de l'origine de la Lune. Comme les théories scientifiques ont du mal à mourir, les trois théories qui avaient cours avant le Programme Apollo (planète double, fission et capture) ont toutes trois survécu aux résultats d'Apollo, bien que souvent profondément modifiées. (ndt : « depuis, une quatrième hypothèse a vu le jour : impact d'un énorme planétoïde qui aurait « emporté » une partie de l'écorce terrestre, le mélange aurait produit la Lune ». André THIOT).

Une théorie de l'origine lunaire complètement crédible doit apporter la preuve que la Lune a été un corps unique et distinct depuis sa formation. Elle doit aussi tenir compte des différences significatives des compositions chimiques de la Terre et de la Lune. Cette disparité chimique est l'obstacle majeur à la théorie de la « double planète », qui avance que la Terre (**page 248**) et la Lune se formèrent ensemble au cours de l'accrétion du nuage de poussière qui devint le système solaire. Il est difficile de penser que de telles différences chimiques majeures puissent s'être produites dans deux corps se formant ensemble si proches l'un de l'autre. En conséquence, les explications les plus habituelles sur l'origine de la Lune associent des versions plus ou moins modifiées des deux autres théories traditionnelles, fission et capture.

Mais la version originelle de la théorie de la fission, (selon laquelle la Lune s'éjecta comme un corps unique sous l'effet du mouvement rotatif rapide de la Terre) a aussi été ébranlée par les données du Programme Apollo. Les différences chimiques entre la Terre et la Lune, et notamment l'absence d'éléments volatils sur la Lune, sont si prononcées qu'il est difficile d'avancer que la Terre et la Lune aient jamais été des parties d'un même corps.

Une variante plus récente de la théorie de la fission suggère que la Lune fut construite graduellement à partir d'une atmosphère chauffée qui avait été éjectée d'une Terre chaude, primitive tournant rapidement. Pendant cette formation, la Terre fut réchauffée par des collisions avec de petits corps jusqu'à ce que la température de ses couches superficielles fut supérieure à 2 000 °C. A une telle température élevée, à la fois des matériaux volatils et certains éléments moins volatils comme le silicium, l'aluminium et le magnésium furent expulsés par évaporation de la Terre primitive à l'intérieur d'une atmosphère dense autour d'elle. Alors que cette atmosphère se refroidissait, les éléments moins volatils se condensaient en petites particules rocheuses qui furent éjectées en orbite autour de la Terre et s'assemblèrent ensuite pour former la Lune. Donc la Lune se développa en se séparant de la Terre, atome par atome au lieu de se séparer d'un seul bloc. Depuis qu'il fut considéré comme valable que la Lune se forma à partir de matériau dont les éléments volatils furent déplacés par un chauffage intense, cette théorie doit tenir compte des compositions chimiques différentes de la Terre et de la Lune ; mais comme la théorie de la fission originelle, elle a encore de nombreuses incertitudes.

La confirmation par Apollo des différences chimiques entre la Terre et la Lune a conduit encore d'autres scientifiques à avancer que la Lune se forma quelque part dans le nuage de poussière solaire et fut ensuite « capturée » par la Terre. Cependant, il y a (**page 249**) quelque désaccord pour savoir « où » dans le système solaire la Lune pouvait s'être formée. La perte des éléments volatils prouve une formation à haute température, ce qui amène certains scientifiques à placer l'origine de la Lune près du centre du système solaire, à l'intérieur de l'orbite actuelle de Mercure. Mais si son origine avait été là, il se serait produit un enrichissement en fer, comme le fit apparemment la planète dense Mercure. Malheureusement pour cet argument, la Lune a un contenu en fer relativement bas. Un autre obstacle à la théorie de la capture est que le corps capturé doit être attiré en étant ralenti pour se mettre en orbite autour d'une planète comme la Terre. Une possible explication est que la Lune fut ralentie tout en se rapprochant et en s'écrasant sur un essaim de plus petits corps qui tournaient autour de la

Terre à ce moment là.

Toutes ces théories expliquent certaines des données concernant la Lune, et elles rencontrent toutes des difficultés pour essayer d'expliquer ces données elles-mêmes ; aucune d'elles ne pouvant être définitivement prouvée ou infirmée. Nous ne comprendrons probablement jamais l'origine de la Lune tant que nous n'aurons pas fait des progrès dans la compréhension de la formation du système solaire lui-même. Nous avons beaucoup à apprendre sur les processus chimiques réels qui ont eu lieu dans le nuage de poussière originel. Nous avons besoin aussi d'en savoir plus sur les processus mécaniques qui ont permis à de petites particules de s'assembler en plus grands corps et qui rassemblèrent ensuite ces corps en Lunes et planètes. Quand nous comprendrons mieux ces mécanismes, nous pourrions apporter des précisions sur le lieu réel de l'origine de la Lune. S'il est prouvé que la Lune a pris naissance à l'intérieur de l'orbite de Mercure, alors une certaine sorte de processus de capture doit s'être produite, par n'importe quel moyen, aussi improbable qu'il puisse paraître. Par ailleurs, si de nouvelles théories tentent d'expliquer comment sur le plan chimique différents corps pouvaient se former proches l'un de l'autre, alors la théorie de la « double planète » pourrait être, après tout, correcte.

De nouvelles questions resurgissent constamment, compliquant toute explication simple du système solaire. Si la formation de grandes Lunes était un phénomène normal lors de la formation de notre système solaire, (**page 250**) où sont les grandes Lunes que nous devrions voir tourner autour de Mercure, de Venus et de Mars ? Il se pourrait que les forces de marée du Soleil aient détruit toutes les Lunes originelles de Mercure et de Vénus. Cependant, cette explication ne s'appliquera pas à Mars qui a seulement deux minuscules astéroïdes capturés, au lieu d'une vraie Lune, car elle est plus loin du Soleil que la Terre.

Une autre question importante qui se pose après le Programme Apollo est celle de savoir si la Lune est chimiquement unique. Six grandes lunes, de la même taille environ que la nôtre, tournent autour des planètes géantes de notre système solaire, quatre autour de Jupiter, une autour de Saturne, et une autour de Neptune. Nous ne savons pas encore si ces autres Lunes partagent l'histoire des hautes températures et des autres particularités chimiques de notre propre Lune, ou si elles sont principalement faites de glace dure comme les planètes qu'elles accompagnent. Une mission spatiale automatique vers les Lunes de Jupiter pourrait répondre à cette question.

LA LUNE ET LA TERRE

Ce que nous avons appris à propos de la Lune a aussi modifié ce que nous pensions à propos de la Terre. Bien que la Terre et la Lune aient des compositions chimiques différentes et des histoires différentes, la Lune est encore un important modèle de ce que pourrait avoir été la Terre primitive. La Lune garde clairement la trace d'une fusion primordiale et d'une décantation chimique généralisée, qui ont produit une stratification interne presque immédiatement après sa formation. Il est probable que la structure interne actuelle de la Terre, y compris son noyau de fer, se soit formée aussi très tôt dans son histoire, peut-être comme une conséquence du processus d'accrétion qui est à son origine.

Le bombardement précoce intense enregistré par la Lune il y a plus de 4 milliards d'années peut

être aussi une caractéristique générale (**page 251**) du système solaire. Si un bombardement intense semblable frappa la Terre à ce moment, cela pourrait aider à expliquer pourquoi aucune roche terrestre âgée de plus de 4 milliards d'années n'a été trouvée.

La découverte de roches anciennes sur la Lune a aussi été à l'origine d'un nouvel enthousiasme pour découvrir l'histoire ancienne de notre propre planète. Cette émulation vient en partie de la découverte de roches âgées d'environ 3,8 milliards d'années au Groenland. Ces vieilles roches terrestres inhabituelles furent trouvées à peu près au même moment que la récolte de laves du même âge, lors de la mission Apollo 11, dans la Mer de la Tranquillité. De plus, la découverte surprenante montrant que les « continents » lunaires sont composés de roches riches en plagioclase telles que les anorthosites et les gabbros (voir pp. **133-134**), provoqua immédiatement un regain d'intérêt pour un groupe de roches terrestres similaires que l'on trouve en petites quantités seulement dans des régions géologiquement anciennes. L'origine de ces anorthosites terrestres est un vieux problème géologique non résolu. Des études comparatives d'anorthosites terrestres et lunaires peuvent aider à expliquer l'origine des deux types de roches, de même qu'elles peuvent expliquer pourquoi une roche qui est d'un intérêt mineur sur Terre, est un des éléments fondamentaux ayant construit la Lune.

La Terre et la Lune apportent deux exemples contrastés de la manière dont les planètes peuvent se développer différemment, et dans ce contraste, nous pouvons voir certains des facteurs qui contrôlent l'évolution des planètes. La taille est importante. Une grande planète peut retenir des matériaux volatils comme l'eau, et elle peut aussi retenir plus de chaleur interne pour produire des changements géologiques continuels. La composition chimique est aussi importante ; une planète sans eau, sans tenir compte de sa taille, manque de l'unique substance essentielle pour la seule forme de vie que nous connaissons. La présence ou l'absence d'éléments radioactifs détermine si une planète sera chaude ou froide pendant toute sa vie, et la quantité de fer dans une planète détermine si elle peut arriver à développer un puissant champ magnétique. Les deux premiers corps que nous avons explorés, la Terre et sa Lune, montrent deux différentes lignes de développement. (**page 252**) Bien que nous pensons que les planètes se sont toutes formées de la même manière, il est presque certain que nous trouverons ultérieurement des histoires planétaires différentes en explorant le système solaire.

ET LES TERRES AU-DELÀ

Les planètes aussi sont devenues soudain familières, car l'exploration de la Lune par l'Homme s'est faite main dans la main avec l'exploration du système solaire par les sondes automatiques. Durant cinq années entre 1968 et 1973, les scientifiques envoyèrent 17 vaisseaux spatiaux lourdement chargés d'instruments pour explorer chacune des cinq planètes connues des anciens astronomes. Mariner 9 fut mis en orbite autour de Mars en Novembre 1971, tournant autour de la planète comme une minuscule troisième Lune et renvoyant sur Terre par radio plus de 7 000 images de cratères, volcans, canyons et dunes de sable de la surface martienne. Deux ans plus tard, en décembre 1973, Pioneer 10 passait sans encombre à travers la Ceinture d'Astéroïdes, transportait ses instruments

dans un tour rapide autour de la planète géante Jupiter, et puis filait au loin pour devenir le premier objet fabriqué de la main de l'Homme à quitter le système solaire. Un vaisseau spatial frère, Pioneer 11, fit le même trajet avec succès un an plus tard, tournant autour de Jupiter, en décembre 1974, et puis, se dirigeant plus loin sur un chemin qui apporta ses instruments et ses appareils photographiques près de la planète aux anneaux, Saturne, en septembre 1979.

Mariner 10 fut lancé dans l'autre direction, vers l'intérieur, en direction du Soleil. Il passa près de Vénus en février 1974, puis s'installa sur une orbite si bien planifiée autour du Soleil que le vaisseau spatial a déjà pu réaliser trois approches de la planète Mercure, prenant des images de cette planète aussi bonnes que nos meilleures vues de la Lune à travers les télescopes terrestres.

(page 253) Nous pouvons maintenant appliquer les leçons tirées de la Lune aux autres planètes. Nous avons appris, par exemple, que la période ancienne de bombardement et de cratèrisation observée sur la Lune semble avoir été générale au moins dans la partie interne du système solaire. Mercure a révélé une surface grêlée qui ressemble à peu près à la surface des continents lunaires (photo 33). La surface de Vénus est enveloppée de nuages, mais un radar terrestre, sondant à travers son atmosphère, a détecté nombre de dépressions circulaires de grande taille qui sont presque certainement des cratères. Mars exhibe deux formes de terrain. Une moitié de sa surface est fortement cratèrisée, alors que l'autre moitié est couverte de structures plus jeunes semblant être des laves volcaniques, de la poussière soulevée par le vent et de possibles lits de rivière.

Par ailleurs, les processus de séparation chimique, de fusion et de volcanisme semblent aussi s'être produits sur les autres planètes. Mercure a un champ magnétique détectable, prouvant l'existence d'un noyau de fer. Des photographies de la surface montrent des ensembles qui ressemblent à des dépôts volcaniques. Cependant, la Lune nous a appris à être prudents à propos des interprétations trop rapides des photographies. Pendant une période précédant l'alunissage d'Apollo 16, au cours de laquelle la plupart des scientifiques pensaient que la Formation Cayley était aussi volcanique, elle se révéla en fait être composée de brèches d'impact.

L'existence de séparation chimique sur Vénus a été démontrée par une seule et unique analyse de la surface par une sonde russe, Venera 8, en juillet 1972. La sonde resta active pendant près d'une heure sur la surface et renvoya une analyse évoquant la composition du granit, une roche qui demande une transformation chimique considérable pour se produire, au moins sur la Terre.

Mars apporte la preuve indubitable d'une évolution chimique et de volcanisme. La moitié de la planète légèrement cratèrisée contient de nombreuses structures qui sont sans aucun doute des volcans. Ils ressemblent aux pics volcaniques des Iles Hawaïi, mais à une beaucoup plus grande échelle. Le plus grand volcan de Mars, Olympus Mons, a 600 kilomètres de diamètre, environ **(page 254)** la taille de l'Etat du Nebraska, et s'élève à environ 25 kilomètres au dessus de la surface de la planète (photo 34).

Non seulement nous avons découvert que la Lune n'est pas un objet originel, mais aussi notre exploration du système solaire a déjà montré qu'aucune des petites planètes n'a de chances d'être un échantillon inaltéré du système solaire. Peut-être devons nous chercher du matériau originel du système solaire dans Jupiter, dans ses Lunes glacées, ou dans les noyaux de comètes passant près de

nous occasionnellement. Nous pourrions même découvrir que l'évolution du système solaire a tellement changé toute sa matière qu'il ne reste rien des ingrédients originaux.

Notre vision de l'univers lointain changea aussi radicalement pendant la décennie consacrée à explorer la Lune. Le même effort technologique qui permit de transporter l'Homme sur la Lune, permit aussi l'invention de nouveaux télescopes optiques et de radiotélescopes pour étudier les confins éloignés de l'Univers à partir de la Terre.

A partir de nouvelles observations, et à partir de découvertes inattendues d'objets inhabituels comme les quasars et pulsars, des astronomes ont récemment pu fixer des limites à la taille et à l'âge de l'Univers connu. L'Univers semble avoir un bord ou une frontière à la distance inimaginable d'environ 15 milliards d'années-lumière⁵² de nous.

Les âges calculés pour l'univers se situent entre 10 et 15 milliards d'années ; il est quelque peu surprenant que l'Univers semble n'être que trois ou quatre fois plus vieux que la Terre.

Par coïncidence, il y a trois théories générales pour expliquer l'origine de l'Univers, comme il y a eu trois théories principales pour expliquer l'origine de la Lune. La théorie du Big Bang suggère que l'Univers commença en un point unique d'où se fit une inconcevable explosion de matière et d'énergie (**page 255**) et que les parties de l'Univers se sont mises à s'en aller depuis dans tous les sens. Un second modèle, « l'Univers à l'état stable » soutient que matière et énergie sont continuellement créées et détruites, sans commencement ni fin. Et une troisième idée est que nous vivons dans un « Univers oscillant » qui d'abord a vécu une expansion à partir d'une explosion primordiale, puis ralentit, s'arrête et finalement se contracte sur lui-même avant de reprendre le processus entier.

Les découvertes des quelques dernières années ont privilégié et renforcé la théorie du Big Bang. L'explosion eut lieu apparemment il y a 10 à 15 milliards d'années, et le « bord » de l'Univers que nous pouvons à peine voir est la coquille extérieure qui a suivi l'expansion à la vitesse approximative de la lumière depuis que l'explosion a eu lieu.

Il n'y a pas de meilleur témoignage d'estime pour la science et la technologie que le fait pour nous d'avoir pu mettre des limites à ce que l'on considérait être un Univers infini et éternel. Mais nous ne sommes pas proches de la solution définitive. Même les partisans de la théorie du Big Bang sont divisés sur le fait de savoir si l'Univers continuera son expansion pour toujours ou s'il se contractera de nouveau pour préparer un autre éclair cosmique pour une autre période de 15 à 20 milliards d'années. Par ailleurs, la simple existence de limites fait surgir immédiatement des questions sur ce qui se trouve au delà d'elles.

Peut-être que dans notre Univers, temps, espace et matière sont reliés si intimement qu'aucun d'eux ne peut être envisagé séparément. Mais le simple fait que de si nombreuses questions puissent surgir et provoquer des débats montre toute la mesure de notre progrès fulgurant. Il y a 200 ans environ, un

52. Une année-lumière est la distance qu'un rayon de lumière, à une vitesse de 300 000 kilomètres par seconde, parcourt en une année. Une année-lumière est équivalente à 9,47 millions de millions de kilomètres, ou environ 6 millions de fois la distance de la Terre au Soleil. L'étoile la plus proche est environ à 4 années-lumière de distance, et notre propre galaxie, la Voie Lactée, a un diamètre d'environ 75 000 années-lumière.

pionnier de la géologie nommé James Hutton (1726-1797) annonçait que la Terre ne montrait « aucune trace de commencement et aucune perspective de fin ». Il a fallu à l'Homme environ 150 ans pour placer des frontières à la spirale de la vie sur Terre et seulement quelques décennies de plus pour repousser les limites de l'Univers lui-même.

(page 256)

NOUVELLE LUNE, NOUVEAUX HOMMES

Le Programme Apollo réaffirmait deux des caractères fondamentaux de l'Homme : curiosité et ingéniosité. Les astronautes, ingénieurs et scientifiques n'étaient pas très éloignés dans leur démarche des hommes qui taillaient des haches de silex, qui racontaient leur monde par des peintures rupestres et qui érigeaient les grandes pierres de l'Observatoire de Stonehenge. Apollo est seulement un autre épisode de l'Homme utilisant son intelligence pour comprendre son environnement, et son habileté grandissante à construire les machines conçues par son cerveau.

Cependant, le Programme Apollo inaugurait aussi une nouvelle dimension dans l'histoire de l'Homme. L'Homme est maintenant un voyageur de l'espace. Il peut quitter la Terre, il peut vivre et travailler dans l'Espace, il peut explorer d'autres planètes. L'Espace est soudainement devenu une partie permanente de l'environnement humain, comme le désert, il y a longtemps, devint un nouveau monde pour les ancêtres lointains de l'Homme.

Par ailleurs, l'Espace est rapidement devenu plus familier au fur et à mesure de son exploration. Nous savons maintenant qu'un voyage spatial, bien que complexe et coûteux, est ni impossible, ni particulièrement dangereux. Un astronaute en route pour Mars sera plus en sécurité que les premiers explorateurs qui traversaient l'Atlantique dans de tout petits bateaux de bois à la découverte de l'Amérique, connaissant beaucoup moins les dangers des terres et des océans que nous connaissons maintenant les risques de l'espace.

En allant sur la Lune, nous avons aussi obtenu une nouvelle vision de la Terre, exactement comme quelqu'un qui a une nouvelle vision de son pays natal en voyageant à l'étranger. Depuis la Lune, la Terre est un magnifique globe bleu dans un ciel noir et pur (photo 35). Les frontières nationales ne sont pas visibles, il n'y a pas de signes de conflit et aucune preuve de la mince couche de la présence humaine à sa surface. Le Programme Apollo a rendu visible la signification du terme « vaisseau de l'espace Terre », et en continuant l'exploration de l'Espace, nous devons en retour appliquer nos nouvelles aptitudes à notre planète afin d'apprendre comment elle fonctionne et comment nous **(page 257)** pouvons continuer à y survivre. L'ancien désert stérile de la Lune est un rappel sinistre de l'étroitesse de la ligne de partage entre la vie sur Terre et la stérilité de notre environnement.

SOMMES-NOUS SEULS DANS L'UNIVERS ?

La Lune n'a pas de traces de vie, mais même son sol stérile contient des traces des éléments chimiques à partir desquels la vie peut naître. Nous avons appris que les ingrédients fondamentaux à

l'origine de la vie sont simples : un soleil, quelques atomes ordinaires et un peu de poussière interstellaire. Puis, dans un incubateur protecteur tel que la Terre, de simples molécules peuvent changer et devenir plus complexes, pour finalement traverser cette frontière étroite qui sépare les molécules chimiques des choses vivantes.

Grâce à notre plus grande connaissance de l'Univers, nous réalisons que ces conditions ont dû s'accomplir des milliers ou même des millions de fois. Dans notre modeste galaxie de la Voie Lactée, il y a au moins 100 milliards d'étoiles. Nombre de ces étoiles ressemblent à notre Soleil, nombre de ces soleils doivent avoir des planètes, et nombre de ces planètes doivent ressembler à la Terre. Les conditions qui sont à l'origine de la vie sur Terre ne paraissent plus extraordinaires. A moins de penser qu'il y ait eu une incroyable association d'improbabilités qui nous ait rendus uniques, il est probable que l'histoire de la vie s'est répétée dans l'Univers de nombreuses fois avec de nombreuses variantes.

La question de la vie ailleurs pourrait aussi voir sa réponse nous parvenir d'une façon inimaginable. Sans que l'on s'y attende, une autre forme de vie pourrait venir à notre rencontre, car cela fait plus d'un demi siècle que nous signalons haut et fort notre existence dans l'Univers. Depuis environ 1900, notre radio, notre télévision et autres signaux radar ont répandu à partir de la Terre des ondes électromagnétiques, emportant la preuve de notre existence à travers l'Univers à la vitesse de la lumière, soit 9 millions et demi de millions de kilomètres par an. Ces signaux sont déjà **(page 258)** passés près d'une centaine d'étoiles, incluant d'aussi familiers compagnons de nos nuits que Sirius, Procyon, Vega, Castor et Pollux, et les signaux resteront reconnaissables quand ils seront passés à côté de milliers d'autres. Si d'autres habitants de l'Univers ont une intelligence, une curiosité et une technologie, ils pourraient venir voir par eux-mêmes ce que signifient ces signaux étranges.

Que la vie existe ailleurs ou non, l'Homme ne sera plus jamais entièrement un terrien. (photo 36). Le ciel au dessus de nous n'est plus une barrière mais un océan sans fin, et nous sommes sur le rivage, analysant l'eau soigneusement. Vus de notre planète, la Lune, les autres planètes et même les étoiles s'étendent comme un chapelet d'îles inconnues, nous encourageant à poursuivre notre exploration. Nous avons fait notre première, brève et prudente traversée. Les drapeaux et engins que nous avons laissés sur la Lune y resteront pendant des millions d'années. Ou ils seront retrouvés par d'autres hommes, ou bien ils signaleront notre existence et notre exploit à d'autres voyageurs de l'espace dont nous ne pouvons même pas imaginer l'allure.

Comme tous les grands événements de l'histoire, Apollo est un tournant, une bifurcation de plus sur une longue route. Une des routes conduit vers l'extérieur pour d'autres explorations et de nouvelles découvertes. L'autre route retourne vers la Terre et vers nous-mêmes, en vue d'un fonctionnement plus intelligent de notre planète. La leçon tirée d'Apollo est qu'aucune route n'est suffisante à elle seule. Dès maintenant nous devons emprunter les deux routes.

ET MAINTENANT ?

Le 14 décembre 1972, le Module Lunaire d'Apollo 17 s'envolait sous la poussée de ses moteurs de

la Vallée Littrow, mettant fin à la série des alunissages Apollo et ramenant à la maison les onzième et douzième hommes qui avaient marché sur la Lune.

Apollo 17 n'est pas la fin de l'exploration de la Lune par l'Homme. **(page 259)** Après tout grand progrès, qu'il s'agisse d'art, de science ou d'exploration, il y a toujours eu une période de réflexion et de préparation du grand bond suivant. Si l'histoire de notre espèce doit nous apprendre quelque chose, elle nous apprend que là où l'Homme est passé une fois, il y repassera.

La même technologie et le même désir de connaissance qui nous conduisirent sur la Lune est maintenant multiplié par mille pour commencer l'exploration rapprochée des planètes éloignées. Le 20 juillet 1976, sept ans exactement après le premier pas sur la Lune de Neil Armstrong, un vaisseau spatial automatique filait à travers l'atmosphère ténue de Mars, ralentissait dans un brusque flamboiement de ses fusées, et se posait doucement sur une plaine rouge parsemée de roches dans une région appelée Chryse. Avec cet atterrissage réussi, le Lander, représentant la moitié d'un vaisseau spatial composé de deux parties, Viking 1 achevait avec succès un voyage d'une année soit 640 millions de kilomètres, de la surface de la Terre à la surface de Mars. Au dessus, l'Orbiter, deuxième moitié du Viking 1, tournait autour de Mars pour relayer vers la Terre les découvertes de Lander sur la nature de la planète Mars.

Viking 1 fut le quatrième essai pour poser en douceur un vaisseau spatial sur Mars. En 1971 et 1973, les Russes posèrent trois petits vaisseaux spatiaux (Mars 2, Mars 3 et Mars 6), mais tous les trois tombèrent en panne pendant ou peu après l'atterrissage. Le succès de Viking fut en partie dû au fait que le vaisseau spatial pouvait faire une inspection de Mars pour trouver le site d'atterrissage le plus sûr avant de faire descendre le Lander.

Après être arrivé sur Mars, Viking 1, resta en orbite un mois entier pendant lequel les scientifiques étudièrent fiévreusement sur Terre les images envoyées par les appareils photographiques d'Orbiter, éliminant les sites d'atterrissage éventuels que les images récentes et précises révélaient comme trop accidentés et risqués. Au même moment, le grand radiotélescope d'Arecibo, à Porto Rico, recevait les ondes radar de Mars, évaluant les accidents de terrain d'autres sites d'atterrissage, à plus de 320 millions de kilomètres de distance. Avec des douzaines de photographies et des centaines de sondages radar, l'atterrissage en sécurité de Viking 1 fut rendu possible, et il fut suivi, le 3 septembre 1976, par la descente réussie également, de **(page 260)** Lander Viking 2 vers une région plus septentrionale de Mars appelée la Plaine de l'Utopie.

Les Landers Viking sont une réalisation technologique presque miraculeuse. Des instruments qui pourraient remplir des pièces entières ont été conçus pour s'adapter à l'intérieur d'un petit vaisseau spatial de moins de 3 mètres de large et pesant seulement 605 kilogrammes.

Le Lander ressemble à une table hexagonale encombrée reposant sur trois pieds, mais il contient un générateur, un studio de télévision, une station météorologique, un détecteur de séisme, une binette articulée pour récolter des échantillons, deux laboratoires de chimie (un pour les analyses de corps organiques et un pour les corps minéraux) et trois incubateurs différents pour ensemenecer et détecter toute forme de vie qui aurait été présente sur le sol rougeâtre de Mars.

Les images de la surface de Mars prises par les appareils photographiques de Lander sont claires et

précises, bien que provenant de signaux radio à plus de 320 millions de kilomètres de distance (distance si grande que, même à la vitesse de la lumière, les ondes radio mettent vingt minutes pour faire le voyage). Les images montrent une plaine horizontale, couverte d'un matériau fin et parsemée de roches d'aspect volcanique. Le « sol » ressemble au régolite ou à du sable humide sur Terre : finement granuleux, cohésif et suffisamment résistant pour supporter le poids du Lander. Au loin apparaissent de petites dunes, des accumulations de poussière rouge sous l'effet du vent, au dessus et derrière des blocs de pierre, et de petites parcelles d'un possible socle rocheux apparent.

Un homme sans scaphandre ne pourrait pas survivre à la surface de Mars. Un souffle de radiation ultraviolette létale venu du Soleil frappe la surface martienne, et il y a trop peu d'air pour respirer. L'atmosphère est inférieure à un pour cent de celle de la Terre, et des mesures faites par les Landers montrent qu'il s'agit essentiellement de dioxyde de carbone (95 pour cent), d'une infime quantité d'oxygène (0,1 – 0,4 pour cent), d'azote (2 à 3 pour cent) et d'argon (1 à 2 pour cent).

Le temps sur Mars est ensoleillé, froid et stable. Un bulletin météorologique typique de Mars, sur le lieu de Viking 1 annoncerait : « clair et froid. Température minimum : -122°F (-86°C) ; température maximum : -25°F (-31°C). (page 261) Pression : 7,7 millibars (environ 0,008 atmosphère). Léger vent d'Est en fin d'après-midi, virant au sud-ouest après minuit. Vitesse moyenne du vent : 2,4 mètres par seconde, avec rafales de 10 mètres par seconde. » Depuis l'atterrissage de Viking 1, la pression atmosphérique a chuté lentement, car probablement le dioxyde de carbone de l'atmosphère a commencé à geler au niveau des calottes polaires de glace, au moment de l'arrivée de l'hiver dans l'hémisphère Sud de Mars. Le ciel de Mars n'est pas bleu comme sur la Terre, mais d'un rose pâle, car l'atmosphère contient une grande quantité de fine poussière rouge.

Au huitième « jour » martien après l'atterrissage de Viking 1, une petite pelle se déploya en dehors du vaisseau spatial, creusa dans le sol situé à proximité, et distribua les échantillons à plusieurs instruments différents. La composition chimique du sol, mesuré par bombardement aux Rayons X, se révéla être assez semblable à du basalte, renforçant l'idée que les roches spongieuses situées autour du Lander pouvaient être des laves volcaniques. Les éléments aluminium, silice, soufre, calcium, titane et fer ont été détectés dans le sol martien. La grande quantité de fer (14 pour cent) renforce le point de vue que la poussière rouge de Mars est un oxyde de fer ou un hydroxyde peu différent de la rouille terrestre.

Si les roches de Mars sont des laves, elles semblent donc différentes des laves terrestres et lunaires. Le sol contient moins d'aluminium que les basaltes terrestres, et il contient beaucoup moins de titane (moins de 1 pour cent) que les laves lunaires. La teneur élevée en soufre (2 à 5 pour cent) du sol martien est inhabituelle et pourrait être produite par des sulfates minéraux. D'ailleurs, un peu d'eau (moins de 1 pour cent) est libérée du sol après chauffage. Les conditions sur Mars sont nettement différentes de celles de la Lune. Il y a de l'eau et de l'oxygène sur Mars, et le sol semble avoir subi une érosion chimique qui ressemble d'une certaine manière à l'érosion et à l'oxydation qui se produit sur Terre.

La tâche la plus ambitieuse des Landers Viking était de trouver certaines formes de vie qui pourraient exister dans le sol de Mars, même à l'état latent. Trois instruments distincts tenaient lieu

d'incubateurs pour les échantillons (**page 262**) de sol, en les mélangeant avec de l'eau et des solutions nutritives, puis faisant des analyses pour détecter toutes substances telles que le dioxyde de carbone ou l'oxygène, qui pourraient être rejetés par des organismes vivants.

Il y eut une période d'enthousiasme quand une forte activité fut trouvée dans les échantillons de sol martien, mais cet enthousiasme était mêlé d'une grande prudence. Personne n'est encore certain, soit que les réactions observées sont dues à des organismes vivants soit à des réactions chimiques étranges entre le sol martien et l'eau contenant les nutriments apportés par les instruments. Il est curieux de trouver ces réactions du sol martien alors que d'autres instruments de Viking n'ont trouvé aucun des dérivés chimiques organiques du carbone, qui représentent les formes élémentaires de la vie terrestre. Jusqu'à ce que les expériences soient terminées et que les données aient été analysées entièrement, il est justifié que les scientifiques soient prudents. Il est encore trop tôt pour que la mission Viking puisse permettre de répondre à la question « Sommes nous seuls ? » Il est presque incroyable que nous ayons même été en mesure de poser cette question déjà sur la surface d'un autre monde.

A bien des égards, Viking a autant rapproché Mars que les alunissages de Surveyor rapprochèrent la Lune une décennie seulement plus tôt. Nous savons maintenant que Mars, comme la Lune, a une surface qui supportera machines et hommes. Nous voyons les roches qui peuvent être collectées. Nous avons nos premières esquisses d'analyses chimiques du sol. Nous connaissons les conditions pour aborder la surface, et nous pouvons construire un équipement pour nous y rendre. Avec ce que nous avons appris du Programme Apollo, Viking peut être suivi de missions automatiques ramenant des échantillons, ou de missions habitées par des hommes.

Viking n'est pas la seule traversée ni Mars la seule destination. D'autres missions ambitieuses planifiées pour l'avenir dépendent des positions des planètes pour décider de leur opportunité. Deux Mariners, 11 et 12, sont sur la liste des lancements en 1977, pour atteindre Jupiter en 1979 et pour passer à côté de Saturne en 1981. Deux Pioneers sont en cours de préparation pour un lancement en 1978 vers Vénus, avec pour chacun un vaisseau spatial en orbite autour de la planète et le lâchage de sondes à travers l'atmosphère épaisse et bouillante en direction de la surface.

(**page 263**) Les États Unis n'ont pas été seuls dans l'exploration des planètes. Dix sept sur les trente et un lancements entre 1961 et 1976 furent des vaisseaux spatiaux russes dirigés sur Vénus et Mars. Plusieurs se posèrent réellement sur la surface de chaque planète et quelques uns survécurent assez longtemps pour renvoyer des informations significatives. Venera 8, qui en 1972 renvoya la première analyse chimique de la surface de Vénus, fut en fait la sixième sonde russe à se poser sur la planète ; ses données suggéraient une composition rocheuse semblable au granit terrestre. A l'automne 1975, deux autres sondes russes destinées à se poser, Venera 9 et 10, réussirent à atteindre Vénus et transmirent les premières photographies de la surface de la planète. Les images montraient d'énormes dalles de pierre et des blocs exposés à l'atmosphère dense et brûlante de la planète.

Les programmes spatiaux russe et américain longtemps distincts, se rapprochèrent brièvement lors du projet-test Apollo - Soyouz, en juillet 1975, quand trois astronautes dans un Module de Commande Apollo rejoignirent deux cosmonautes russes dans un vaisseau Soyouz. Cette « poignée de main de l'espace » ne dura que quelques jours, mais il était le résultat de plusieurs années de coopération

pendant lesquelles américains et russes visitèrent à tour de rôle les sites de lancement et travaillèrent avec les équipements. L'effort de coopération Apollo-Soyouz est prometteur sur les intentions des deux grands compétiteurs de l'espace de laisser de côté leurs différences suffisamment longtemps pour devenir des collaborateurs.

APOLLO : L'HÉRITAGE INCONNU

Nous avons seulement commencé à exploiter les résultats scientifiques du Programme Apollo, et même notre étude des échantillons lunaires eux-mêmes en est juste à son début. Les six alunissages Apollo rapportèrent un total de 382 kilogrammes de roche lunaire et de régolite, et ce total représente maintenant 50 000 échantillons distincts, grandes et petites roches, brèches complexes, **(page 264)** petits fragments de régolite, et 1 à 2 mètres de carottes de la couche de régolite. Malgré les efforts intenses de centaines de scientifiques depuis plus de 6 ans, environ un quart seulement de ce matériau a été examiné, et des analyses détaillées n'ont été faites que sur environ un dixième de celui-ci.

Tout ce que nous savons sur les roches de Lune vient seulement d'une petite fraction du matériau rapporté. La conservation et l'étude attentive des échantillons lunaires restants sont une part essentielle de l'exploration future de la Lune, et la NASA continue un programme actif d'études des échantillons lunaires. Les types de roches lunaires les plus fréquents ont été maintenant bien décrits, et les scientifiques peuvent chercher parmi les roches restantes et les brèches, des éléments inhabituels. Cette recherche pourrait découvrir certaines variétés inattendues de roches lunaires, ou des roches provenant de la partie interne profonde de la Lune, ou des laves plus jeunes que celles analysées jusqu'à maintenant.

Les échantillons de régolite, de brèches et de carottage sont l'objet d'une attention particulière car elles contiennent la trace de l'histoire du Soleil, de la nature des radiations cosmiques et de la présence des matériaux volatils. Il y a assez de matériau ici pour occuper des armées de scientifiques ; un seul gramme de régolite peut contenir jusqu'à dix millions de très fines particules distinctes, chacune d'entre elles pouvant avoir sa propre histoire et une trace isolée de vent solaire. L'ouverture et l'étude des tubes de carottage profond dont certains contiennent un demi milliard d'années d'histoire lunaire, sera lui-même un projet scientifique majeur.

RETOUR AU TÉLESCOPE

Le Programme Apollo donna naissance à une nouvelle ère de l'astronomie lunaire à partir de la Terre. Pour la première fois dans l'histoire, l'Homme peut maintenant diriger ses télescopes vers un autre monde dont la composition superficielle a été précisée par des échantillons rapportés et dont les caractéristiques de la surface ont été observées de très près. En utilisant les critères définis par le Programme Apollo, les **(page 265)** astronomes peuvent maintenant déterminer la composition chimique, la topographie, le flux de chaleur et la nature de la couche superficielle sur toute la face visible de la Lune.

A ce jour, les astronomes, grâce aussi à leurs instruments modernes, ne sont plus limités dans leurs

descriptions visuelles de la Lune. Des analyses de la lumière solaire réfléchi par le régolite peut apporter une information sur sa composition chimique. Les faibles ondes radio et infrarouges émises par la Lune contiennent des informations sur la température et le flux thermique de la surface lunaire. Les ondes radar envoyées de la Terre se réverbèrent sur la Lune grâce à des instruments suffisamment puissants pour atteindre la planète Saturne et permettent d'explorer la forme de la surface lunaire et de dessiner ses montagnes et vallées avec une précision de quelques mètres.

ASTRONAUTES ROBOTS DU FUTUR

La prochaine machine à aller sur la Lune sera probablement un Lunar Polar Orbiter, un vaisseau spatial prévu pour observer et analyser toute la surface de la Lune à partir d'une orbite lunaire. Il sera installé de manière à ce que son orbite passe par les pôles Nord et Sud de la Lune au lieu d'être limitée à l'équateur lunaire analysé par les missions Apollo.

Le Lunar Polar Orbiter rendra possible de nouvelles mesures scientifiques qui jusqu'ici n'ont été faites que sur environ 20 pour cent de la surface lunaire. Sur une orbite polaire autour de la Lune, le vaisseau spatial passerait en fin de compte au dessus de toute sa surface, car la Lune tourne sur son axe une fois par mois alors que l'Orbiter la survole.

Des échantillons lunaires ont déjà été obtenus par des moyens mécaniques. Le 20 septembre 1970, un vaisseau automatique russe, Luna 16, se posa sur la Mer de la Fécondité. En utilisant une foreuse, le vaisseau récolta un échantillon de régolite de 100 grammes et le rapporta sur Terre. **(page 266)** Un pas important dans la coopération spatiale internationale fut franchi avec le don aux scientifiques américains de matériau ramené par Luna 16 en échange d'échantillons de régolite d'Apollo 11 et 12.

Les instruments disponibles pour les analyses d'échantillons lunaires sont si sensibles et si précis que la petite quantité de matériau de Luna 16 offerte par les Russes (environ 3 grammes, le poids de 10 comprimés d'aspirine) a fourni une impressionnante quantité d'informations.

Les scientifiques découvrirent que la surface de la Mer de la Fécondité était recouverte de laves basaltiques pauvres en titane et âgées de 3,4 milliards d'années. Les laves étaient semblables mais légèrement plus vieilles que les roches rapportées de l'Océan des Tempêtes (Apollo 12). Même à une distance considérable des sites d'Apollo, les laves semblent encore être âgées d'environ 3 milliards et demi d'années. Le régolite de Luna 16 a aussi été fortement exposé aux particules atomiques cosmiques et solaires, à la surface de la Lune, mais il est difficile d'en interpréter les effets, car il y a très peu de matériau disponible pour l'étude.

Dix sept mois plus tard, le 21 février 1971, Luna 20 se posait sur une zone des continents lunaires entre la Mer de la Fécondité et la Mer des Crises. Des échantillons de ce régolite, également échangé avec les scientifiques américains, montraient qu'ils étaient composés de roches broyées riches en plagioclase semblables aux brèches rapportées par la mission Apollo 16 des « continents » proches de Descartes.

Les Russes poursuivent leurs prélèvements d'échantillons lunaires au moyen de vaisseaux spatiaux automatiques. Le 18 août 1976, Luna 24 se posait avec succès sur la Mer des Crises, une petite mer

circulaire sur le bord Est de la Lune. Le vaisseau forait environ sur deux mètres d'épaisseur le régolite, puis revint sans dommage avec une carotte de régolite qui fournit un échantillon unique de la nature et de l'histoire d'une partie inconnue de la Lune.

Les vaisseaux spatiaux existants ou leurs descendants plus complexes, peuvent facilement ramener des échantillons similaires de la Lune. Nos instruments d'analyse permettent d'obtenir une grande quantité d'informations scientifiques à partir d'un échantillon très petit, et notre expérience avec les échantillons plus importants des missions Apollo (**page 267**) permet un contrôle nécessaire de nos interprétations ⁵³.

Lors des futures missions, il sera possible de combiner la récolte automatique d'échantillons avec un véhicule se déplaçant sur la surface de la Lune. Jusqu'à présent, les Russes ont seuls l'expérience des véhicules lunaires à déplacement automatique. Certaines de leurs missions Luna, au lieu de ramener des échantillons, posèrent un véhicule sur roues, le Lunokhod (à peu près le « marcheur lunaire »). Contrôlé depuis la Terre, le véhicule se déplace sur la Lune tout en transmettant des images télévisées et des données sur la nature physique et chimique de la surface.

De futurs véhicules itinérants pourraient faire des centaines de kilomètres, en mesurant la composition chimique, la gravité, les propriétés magnétiques de la surface tout en se déplaçant. Des véhicules plus complexes, équipés de caméras de télévision et guidés depuis la Terre, pourront examiner la géologie locale et récolter des échantillons. A la fin du parcours, le chargement pourrait être transporté vers un petit vaisseau spatial afin de revenir sur Terre.

Où enverrons-nous ces engins lors des missions futures ? Les alunissages sur la face visible de la Lune sont les plus faciles à contrôler car les machines sont toujours dirigées vers la Terre et peuvent recevoir des instructions en permanence. La recherche (**page 268**) de roches volcaniques jeunes sur les « mers » est une des choses les plus importantes qui pourrait être faite sur la face visible de la Lune, car elle aiderait à établir de nouvelles limites de l'histoire thermique de la Lune. Des études du nombre et de la répartition des cratères sur les « mers » suggèrent que de jeunes roches volcaniques pourraient être trouvées dans certaines parties de la Mer des Pluies et de l'Océan des Tempêtes ; des

53. Il y a une discussion continue concernant la possibilité d'obtenir des résultats scientifiques moins coûteux que ceux du Programme Apollo, en utilisant des sondes automatiques pour échantillonner la Lune, telles que Luna 16 et Luna 20. Dans de nombreux cas, la réponse est non. Les sondes automatiques ne rapportent qu'une petite quantité de régolite et aucune grosse roche. Le seul âge de formation déterminé pour le matériau de Luna 16 fut rendu possible par un incroyable effort d'analyse très poussée sur un petit éclat de roche de 0,062 gramme. Les échantillons plus grands rapportés par les missions Apollo furent essentiels pour la connaissance des âges de formation et d'exposition des brèches de « continents », des microcratères, du magnétisme lunaire, de la nature du vent solaire, des particules de rayons cosmiques et de la stratification et de l'histoire du régolite. La détermination des âges de formation mesurés sur des roches lunaires de bonne taille fut particulièrement importante. Sans cette connaissance, nous aurions pu conclure que l'âge modèle du régolite, d'environ 4,6 milliards d'années, était l'âge réel des laves de « mer ». Sans les grosses roches d'Apollo, sur lesquelles les âges réels de formation purent être déterminés, toute notre vision de l'histoire de la Lune pourrait avoir très mal commencé, et nous n'aurions jamais pu apprendre que la Lune a été une planète active ayant évolué pendant un milliard et demi d'années.

âges aussi récents que 2,5 à 1,7 milliards d'années ont été envisagés pour ces roches. Si ces âges pouvaient être vérifiés à partir d'échantillons ramenés sur Terre, toute l'histoire de la Lune devrait être révisée. Les collines Marius (voir photo 8), qui ont déjà été identifiées comme les plus jeunes structures volcaniques sur la Lune, sont un site d'alunissage évident pour une telle mission.

Une autre mission automatique pourrait essayer de déterminer l'origine des phénomènes lunaires transitoires en se posant là où ils ont été vus le plus souvent, dans les cratères Aristarque, Alphonse ou Platon. En plus d'une récolte d'échantillons de possibles roches volcaniques récentes, le vaisseau spatial pourrait laisser des instruments derrière lui pour attendre la prochaine « éruption », un sismographe pour détecter un tremblement lunaire, un appareil de mesure de flux thermique et un détecteur d'atmosphère pour échantillonner des émissions de gaz.

Beaucoup reste à faire sur la face visible de la Lune, mais la face cachée presque entière reste inexplorée, et les scientifiques sont impatients d'y envoyer des instruments et d'obtenir des échantillons. La curieuse anomalie magnétique près du cratère Van de Graff (voir p. 243) est un site évident pour installer un ensemble d'instruments, et le cratère Tsiolkovsky rempli de matériau de « mer » (voir photo 31), pourrait procurer des échantillons à la fois de la croûte continentale et de matériau sombre de « mer » qui est si rare sur la face cachée de la Lune pour une raison ou pour une autre.

L'alunissage d'un vaisseau spatial sur la face cachée de la Lune est un problème difficile. Sur la face cachée de la Lune, le vaisseau spatial est coupé des communications radio et ne peut pas être contrôlé directement à partir de la Terre. Une solution est de construire un vaisseau spatial qui peut être programmé d'avance pour se poser et accomplir ses tâches sans aucun contact avec la Terre. Cependant, une **(page 269)** solution plus simple et moins coûteuse est de mettre un satellite relais en orbite au dessus de la face cachée de la Lune, où il peut « voir » à la fois la Terre et la face cachée de la Lune en même temps. Heureusement, la nature a fait l'essentiel du travail pour nous. A quelque distance au delà de la Lune, se trouve un point où les champs de gravité de la Terre et de la Lune se combinent de telle manière qu'un satellite placé là, y restera toujours, restant au dessus de la face cachée de la Lune alors que la Lune tourne sur son orbite.

Avec un tel satellite relais en orbite, une communication presque continue entre la Terre et les instruments de la face cachée de la Lune serait possible, et des explorations plus ambitieuses peuvent être planifiées. Le pas scientifique le plus important sera probablement l'alunissage d'un groupe de sismographes afin d'explorer l'intérieur de la Lune sous les « continents ». Des ensembles d'instruments plus complexes pourraient mesurer ainsi les propriétés chimiques et physiques.

Il pourrait bientôt aussi être possible d'installer des instruments sur la face cachée pour étudier des objets situés au delà de la Lune. La face cachée de la Lune est un endroit idéal pour faire de l'astronomie ; il est totalement dépourvu d'air, absolument sombre la moitié du temps, protégé derrière toute la masse de la Lune des lumières et des bruits radio qui rendent difficiles sur la Terre aussi bien l'astronomie optique que la radioastronomie. De petits télescopes automatiques installés là pourraient faire des observations qui sont impossibles à réaliser avec les instruments sur Terre. Ils pourraient observer la lumière ultraviolette et infrarouge des étoiles, et chercher de nouvelles sources

d'ondes radio, de Rayons X et de rayons gamma dans le ciel ; et même peut-être trouver de nouveaux objets étranges comme sont quasars, pulsars et trous noirs.

Les États Unis pourraient ne pas avoir à entreprendre ces explorations seuls. La nouvelle pratique de la coopération internationale dans l'exploration de la Lune est un important résultat du Programme Apollo. Il y a le précédent de l'Antarctique où de nombreuses nations et notamment les États Unis et la Russie coopèrent depuis plus d'une décennie pour l'exploration scientifique d'un continent dont la surface représente le tiers de celle de la Lune. Les plus récents exemples des échanges d'échantillons lunaires et **(page 270)** la jonction Apollo-Soyouz sont aussi des indices encourageants pour une future coopération dans l'Espace entre les États Unis et la Russie. Il est possible maintenant de planifier une mission de jonction au cours de laquelle un vaisseau spatial Luna russe descendrait échantillonner le cratère Tsiolkovsky guidé par un satellite relais américain fixé au dessus de la face cachée de la Lune. Des géologues pourraient facilement projeter des traversées d'un Lunokhod russe qui collecterait des échantillons le long d'un trajet d'une centaine de kilomètres de long et transférerait ces échantillons vers un vaisseau spatial robot américain pour le retour sur Terre. Ou bien, cela pourrait être un véhicule américain et un vaisseau spatial russe. Ni les risques de l'exploration lunaire ni l'état de notre technologie ne sont les facteurs déterminants si une telle exploration en coopération peut se faire. Nous savons maintenant que de telles missions de jonction sont possibles si les gouvernements et des individus responsables décident qu'elles peuvent être réalisées.

Un autre grand apport venu du Programme Apollo est la confiance. Déjà l'exploration de la Lune a transformé un grand défi inconnu en une affaire de technique relativement familière. Ce qui déterminera la future exploration de la Lune n'est plus notre ignorance et notre incertitude de l'Univers, mais les ressources de désir, de talent et d'argent qui ne dépendent que de nous.

Pendant cette période suivant Apollo, la Lune est devenue d'une certaine manière aussi familière que la Terre, et les autres planètes sont en passe de devenir aussi familières que la Lune était il y a une décennie. La Lune n'est plus simplement notre satellite, mais elle est devenue une base et un terrain d'essai, la Lune n'est plus une destination mais une étape sur la route de l'exploration qui se poursuit.

En dépit de notre domestication partielle de la Lune, il serait insensé de penser que nous avons appris tout ce qui est important ou intéressant sur elle. Le Programme Apollo nous a permis, comme disait Newton, de choisir quelques cailloux sur le bord d'un océan illimité, mais il y a encore beaucoup à apprendre en étudiant la plage alors que nous faisons des plans pour partir à l'aventure sur l'océan lui-même.

(page 271)

APPENDICE 1

CHRONOLOGIE DES MISSIONS APOLLO HABITÉES

Mission	Date de lancement	Astronautes	Durée
Apollo 7	11 octobre 1968	Walter M. Schirra, Jr Donn F. Eisele R. Walter Cunningham	10 j 20 h 09 min
Apollo 8	21 décembre 1968	Franck Borman James A. Lovell, Jr William A. Anders	6 j 03 h 01 min
Apollo 9	3 mars 1969	James A. Mc Divitt David R. Scott Russel L. Schweickart	10 j 01 h 01 min
Apollo 10	18 mai 1969	Thomas P. Stafford Eugene A. Cernan John W. Young	8 j 00 h 03 min
Apollo 11	16 juillet 1969	* Neil A. Armstrong * Edwin E. Aldrin Michael Collins	8 j 03 h 18 min
Apollo 12	14 novembre 1969	* Alan L. Bean * Charles P. Conrad Jr Richard F. Gordon Jr	10 j 04 h 36 min
Apollo 13	11 avril 1970	James E. Lovell, Jr Fred W. Haise, Jr John L. Swigert, Jr	5 j 22 h 55 min
Apollo 14	31 janvier 1971	* Alan B. Shepard * Edgar D. Mitchell Stuart A. Roosa	9 j 00 h 02 min
Apollo 15	26 juillet 1971	* David R. Scott * James B. Irwin Alfred M. Worden	12 j 07 h 12 min
Apollo 16	16 avril 1972	* John W. Young * Charles M. Duke Jr Thomas K. Mattingly II	11 j 01 h 51 min

Apollo 17

7 décembre 1972

* Eugene A. Cernan

12 j 13 h 52 min

*Harrison H. Schmitt

Ronald E. Evans

- * indique ceux des astronautes qui se posèrent et marchèrent sur la Lune

APPENDICE 2

LES GRANDS MOMENTS DES VOLS APOLLO HABITÉS

Mission	Site d'alunissage	Grands moments
Apollo 7		Premier vol habité. 163 révolutions complètes autour de la terre.
Apollo 8		Premier vol habité autour de la Lune. 10 révolutions complètes autour de la Lune. Message radiodiffusé de Noël adressé à la terre.
Apollo 9		Premier test du Système Apollo complet en orbite terrestre. Séparation et verrouillage du Module Lunaire. Sortie dans l'espace de Schweickart. 151 révolutions complètes autour de la terre.
Apollo 10		Test du système Apollo complet autour de la Lune. « Tour de chauffe » pour la mission d'alunissage. 31 révolutions complètes autour de la Lune. Le Module Lunaire descendit jusqu'à 15 km de la surface lunaire.
Apollo 11	Mer de la Tranquillité	Premier alunissage. Armstrong et Aldrin passèrent 21 heures 38 minutes sur la Lune. Retour d'échantillons lunaires: régolite et roches basaltiques de « mer ».
Apollo 12	Océan des Tempêtes	Deux excursions sur le terrain lunaire. Retour d'échantillons de différents basaltes plus jeunes. Rapportèrent des morceaux du vaisseau spatial Surveyor 3.
Apollo 13		Alunissage sur Fra Mauro annulé en raison de l'explosion du réservoir d'oxygène dans le Module de Commande. Retour sains et saufs des Astronautes en utilisant le Module Lunaire comme canot de sauvetage. Une photographie de la Lune effectuée. Utilisèrent leur étage S 4 B pour réaliser un impact sur la Lune qui fut détecté par le sismographe d'Apollo 12
Apollo 14	Fra Mauro	Étude d'anciennes brèches sur Fra Mauro. Longue marche vers le cratère Cône (plus de cinq km).
Apollo 15	Sillon Hadley et Monts Apennins	Première utilisation de la Rover Lunaire. Les Astronautes voyagent plus de 24 km (15 miles) sur la Lune. Installèrent la première sonde à flux thermique. Récoltèrent une variété de roches complexes dans le Canyon d'Hadley et sur la face des Monts Apennins. Photographies et analyses de la surface lunaire obtenues en orbite. Récolte de la « Roche de la Genèse » (anorthosite). Lancement d'un subsatellite en orbite autour de la Lune
Apollo 16	Le plateau Descartes	Premier alunissage sur le « continent » lunaire. Long parcours avec la Rover Lunaire vers « Stone Mountain » et cratère « North Ray ». Récolte de roches écrasées et déformées riches en feldspath (anorthosite et gabbro).
Apollo 17	Monts Taurus et Vallée Littrow	Dernière Mission Apollo. Long parcours en Rover Lunaire à travers la Vallée Littrow. Récolte de roches basaltiques sur le fond de la Vallée et de brèches près des collines. Récolte du Sol Orange. Installation d'une seconde sonde thermique et vérification d'un flux thermique élevé.

BIBLIOGRAPHIE

BALDWIN, R. B. *The Measure of the Moon*. Chicago : University of Chicago Press, 1963.

BARBOUR, J. (ed.). *Footprints on the Moon*. New York : Association Press, 1969.

COLLIN, M. *Carrying the Fire : An Astronaut's Journeys*. New York : Ballantine, 1975

COOPER, H. S. F. *Apollo on the Moon*. New Yory : Dial, 1970.

_____. *Moon Rocks*. New Yory : Dial, 1970.

JASTROW, R. *Red Giants and White Dwarfs*. New York : Signet, 1969.

KING, E. A. *Space Geology*. New York : John Wiley & Sons, 1976.

LANGSETH, M. , L. LAGSETH. *Apollo Moon Rocks*. New York : Coward, McCann, and Geoghean, 1972. (For very young readers.)

LOWMAN, P. D. *Lunar Panorama : A Photographic Giude to the geology of the Moon*. Zurich, Switzerland : Weltflugbild Reinhold A. Müller, 1969.

MAILER, N. *Of a Fire on the Moon*. New York : Signet, 1970.

MUTCH, T. A. *Geology of the Moon : A stratigraphic View*. Princeton, N. J. : Princeton, N. J. : Princeton University Press, 1970.

SHKLOVSKII, I. S., and C. SAGAN. *Intelligent Life in the Universe*. New York : Dell/Delta,

1968.

SHORT, N. M. *Planetary Geology*. Englewood Cliffs, N.J. : Prentice-Hall, 1975.

TAYLOR, S. R. *Lunar Science : A Post-Apollo View*. New york : Pergamon Press, 1975.

WILFORD, J. N. *We Reach the Moon* : The New York Times.

Story of Man's Greatest Adventure. New York : Bantam, 1969.

Index

Abbott, C. G.	expériences scientifiques en orbite,
Acides aminés	résultats des,
Accrétion des planètes,	instruments scientifiques,
	vaisseau spatial,
Ages, des roches,	satellite secondaire placé en orbite lunaire,
âges d'exposition(roches lunaires)	<i>voir aussi</i> Astronautes, missions Apollo
âges de formation,	spécifiques,
mesure des	récolte de vent solaire par,
âges modèle	Apollo 12 (Oceanus Procellarum) ,
âges relatifs	pièces de Surveyor 3 rapportées par,
Altimètre Laser, <i>voir</i> Laser	Apollo 13, accident,
Anaxagoras	Apollo 14 (Fra Mauro),
Anorthosite (nom de roche) : sur les	Apollo 15 (Hadley-Apennins),
continents lunaires	mesures du flux thermique,
terrestres	géologie du site d'alunissage,
Apatite (nom de minéral)	expériences scientifiques,
Apennins, Monts,	récoltes d'échantillons par,
mission Apollo vers	Apollo 16 (Descartes)
Evénement Imbrium et,	Apollo 17 (vallée Littrow)
Apollo, programme :	récolte de « Sol Orange » par,
impacts artificiels sur la Lune,	Apollo-Soyouz, projet d'essai,
coût du,	Aristarchus,
justification pour,	
missions,	

Aristote

Armacolite (nom de minéral),

Astéroïdes (ceinture d'Astéroïdes),

Astronomie, histoire de,

Astronautes :

activités sur la Lune,

« flashes oculaires » des rayons cosmiques,

noms des,

risques de l'Espace pour,

entraînement des,

voir aussi Apollo, missions,

Atmosphères :

de la Terre,

de la Lune,

des planètes,

Aurores,

Baldwin, R. B.,

Becquerel, H.,

Basaltes, laves (nom de roche) :

composition des,

refroidissement et cristallisation des,

minéraux des,

origines des,

terrestres,

températures des,

Base de la Tranquillité,

« Big Bang », théorie du,

Biologie, rythmes,

Boltwood, B. B.,

Brahe, Tycho,

Brèches (nom de roche),

formation de cristaux dans,

formation par impact météoritique,

gaz chauds inclus dans,

importance des,

nature et origine des,

échantillons,

Capture, théorie de la,

Carbone :

dans les roches et le sol lunaires,

dans le vent solaire,

essentiel à la vie,

Cayley, Formation,

Ceres (astéroïde) ,

Comètes,

« Command Module » (CM)

voir Module,

Composés organiques : dans l'espace interstellaire, ; dans le régolite, ; précurseurs de la vie

Continents, lunaires : aspect de, âge des,

composition chimique des, définition

premiers bombardements des

magnétisme des, variétés de roches

des, régolite sur les,

Copernicus, N.,

Cosmique, poussière,(voir aussi Poussière)

reçue sur Terre,

quantité de,

et formation de composés organiques,

et formation de composés organiques

Cosmiques, rayons, (voir aussi Rayons)

composition des,

détection sur les casques des ,

astronautes,

effets sur les roches lunaires,

effets sur les météorites,

énergie des,

provoquant des flashes oculaires,

nature et origine des,

histoire des,

variation d'intensité des,

« Coup de Soleil » sur la Lune,

Cratères, lunaires, différents : Alphonsus,
 Archimedes, Aristarchus, Bailly,
 Clavius, « Cone », Copernicus,
 Descartes, Erathostenes, Fauth,
 Fra Mauro, « North Ray », Plato,
 “Shorty”, “South Ray”, Tsiolkovsky,
 Tycho, Van de Graff, West
 Cratères, impact de météorite : ancien,
 preuve de, ejecta provenant de,
 formation de, pénétration dans le socle
 rocheux par, terrestres, exemples de,
voir aussi Microcratères
 Cratères, volcaniques : lunaires, terrestres
 Curie, M.,
 Curie, P.,

Darwin, G. H.,
 Dietz, R. S.,
 « Double-Planète », théorie de la,
voir aussi Planète Double

Eau : sur la Terre, ; dans les échantillons
 lunaires, ; sur Mars, ; sur la Lune,
 Echantillons lunaires : quantités rapportées, ;
 aspect des, ; préservation et distribution des, ;
 récoltes par les astronautes, ; recherches sur, ;
 premiers résultats scientifiques sur, ; *voir aussi*
 Roches lunaires, Sol lunaire
 Echantillons lunaires, variétés : « Grosse
 Bertha », ; « Brèche 12013 », ; « Motte
 Verte », « Maison rocheuse », ; « Sol
 Orange », « Roche Rouillée »
 Eclipses, de Lune et de Soleil,
 Ejecta, des cratères d’impact de météorite,
 Electronique, microsonde, *voir aussi*
 Microsonde,
 Eléments volatiles : disparition de la surface
 de la Lune, ; dans les roches lunaires, ; dans
 l’atmosphère lunaire, ; mouvement à la surface

de la Lune,
 Expériences scientifiques en orbite,
 Erathostenes,
 Exploration spatiale automatique, :
 différences avec les missions habitées, ;
 missions futures, ; de la Lune, ; des planètes, ;
 missions rapportant des échantillons,
 Explosions solaires : particules atomiques
 venant des, ; effets terrestres, ; effets sur les
 roches lunaires, ; risques pour les astronautes, ;
 nature et origine des, ; étude historique des,
 « Exposition, âges de » des roches lunaires,
voir aussi Ages d’exposition

Face cachée, de la Lune ; *voir* Lune, face
 cachée de,
 Faille de San Andreas, *voir* San Andreas,
 « Farce Lunaire »,
 Feldspath (nom de minéral) ; *voir*
 Plagioclase
 Fer : dans les rayons cosmiques, sur Terre,
 des roches lunaires, sur la Lune, dans les
 planètes, dans les protubérances solaires
 « Fission », théorie de la,
 Flux de chaleur : importance du, lunaire,
 mesure du, terrestre
 Fossiles, dans l’histoire Terre-Lune,
 Fra Mauro, Formation : nature de,
 alunissage d’Apollo 14 sur,
 origine de,
 Futur de l’exploration spatiale ;
 dans la coopération internationale,
 de la Lune,
 des missions de récolte d’échantillons,
 Fusée Saturne, ; impacts de S4B sur la Lune,

Gabbro (nom de roche),
 Gagarine, Y. A.,

Galactiques, rayons cosmiques ; *voir*
 Rayons cosmiques
 Galaxie, Voie Lactée,
 Galilée,
 Gast, P. W. ,
 Gaz, sur la Lune : dus au vaisseau spatial
 Apollo, ; dans l'atmosphère lunaire ;
 venant de l'intérieur ; dans les roches
 lunaires ; dans le régolite
 Gaz nobles (Helium, Néon, Argon, Krypton,
 Xénon, Radon) : sur la Lune, ; dans le vent
 solaire,
 Genèse, « Roche de la », *voir* Roche
 Gilbert, W.
 Goddard, R. H.
 Granite (nom de roche) : sur Terre, sur
 Venus
 Gravité : sur Terre ; sur la Lune ; con-
 centration de masse et ; variations

 Hadley, Sillon, *voir* Sillon
 Hermes (astéroïde)
 Herschel, J.
 Herschel, W.
 Hevelius
 Hipparchus,
 Hooke, R.
 Hutton, J.,
 Hydrogène : d e l'atmosphère lunaire,
 des protubérances solaires, dans le vent
 solaire, dans le Soleil,

 Icarus (astéroïde),
 Ilménite (nom de minéral),
 « Imbrium, Evènement »,
 Impact ; *voir* météorite ; Cratères, impact
 de météorite
 Impactites polygéniques à fort taux de
 fusion, (« impact melt »)

Isotopes

 « Jardinage », sur le régolite,
 Jour, allongement du,
 Julius Caesar,
 Jupiter : atmosphère de, champ magnétique
 de, lunes de, « bruit » d'ondes radio de,
 missions des sondes spatiales vers,

 Kelvin, Lord,
 Kennedy, J. F.,
 Kepler, J.,
 Kozirev, N. A.,
 KREEP, marériau à : composition du, le
 composant magique du régolite,
 , âges modèle du, radioactivité et chaleur du,

 Langrenus,
 Laser, Réflecteur, Terre-Lune, *voir* Réflec-
 teur,
 Laser, Altimètre, *voir* Altimètre,
 Laves, écoulements, ; *voir aussi* Basalte
 des laves, Mers
 Locke, R. A.,
 Lowell, P.,
 Luna, sonde spatiale (inhabitée, ex URSS)
 véhicule Lunokhod, photographie de la Lune
 par, retour d'échantillons lunaires par
 Lunar Orbiter, programme, découverte de
 « mascons », photographies par,
 Lunar Polar Orbiter,
 Lune, Face cachée de,
 Lune : âge de la, atmosphère de, aspect de la,
 bombardement par des météorites,
 caractéristiques de, cartes et cartographie de,
 champ magnétique de, composition chimique
 de, continents de, *voir* Continents lunaires,
 cratères sur, *voir* Cratères, densité de, eau sur,
 échantillons de, *voir* Echantillons lunaires,

éclipses de, éloignement de la Terre,
émissions de gaz de, érosion sur, face cachée
de, forme de, flux de chaleur de, folklore et
mythologie sur, gravité de, fusion de, marées,
mers de, *voir* Mers lunaires, mesure du temps
avec, montagnes sur, noyau de, histoire

de, observations astronomique à partir de,
observations télescopiques de, origine de,

perte des éléments volatils de, phases de,
photographies de, radioactivité de, régolite de,
voir Régolite lunaire, révolution autour de la
Terre, roches de, *voir* Roches lunaires,
rythmes biologiques, séismes lunaires, sillons
de, *voir* Sillons lunaires, structure interne de,
température interne de, température de surface
de, surface de, absence de vie sur, littérature
sur, volcanisme sur, *voir aussi* Phénomènes
Lunaires Transitoires,

Lunes, d'autres planètes,

Marées : sur Terre, ; et système Terre-
Lune, ; et séismes, ; effets sur la Lune, ;
ralentissement de la Terre sous l'effet de,

Motte verte,

NASA, (National Aeronautics, and Space
Administration) ,

Nébuleuse solaire,

Newton, I.,

Nicetas de Syracuse,

Noyau : de la Terre, ; de la Lune, ; des
planètes, ; et champs magnétiques

« Nuage de poussière » théorie de,

Oersted, H. C. ,

Olivine (nom de minéral),

Ondes de choc : des impacts de météorites, ;

déformation des roches par,

Orbiter, *voir* Programme de l'Orbiter
Lunaire, Orbiter Polaire, Lunaire,

Particules, traces, ; sur les casques des
astronautes, ; dans les roches lunaires, ; dans
les lentilles des appareils- photo de Surveyor 3

Phénomènes Lunaires Transitoires,

Pickering, W. H.

Pioneer, Programme : missions Jupiter,
vaisseau spatial, ; missions Vénus

Plagioclase (Feldspath) (nom de minéral)

Planètes : atmosphères de, ; noyaux de, ;
exploration de, par vaisseau spatial, ; formation
des, ; histoires et évolution des, ;

chaleur interne des, ; champs magnétiques
des, ;

« Planète double » théorie,

Plato,

Plomb : utilisation pour la mesure de l'âge, ;
perdu par la Lune, ; vaporisation sur la surface
de la Lune

Potassium,

Poussières cosmiques, ; accumulation sur la
Terre, ; quantité de, ; et formation d'éléments
organiques,

Ptolémée, Système de,

Ptolémée, C. ,

Programme de l'Orbiter lunaire, ; découverte
de mascons, ; photographie par,

Programme Surveyor, ; composition
chimique de la Lune, ; tests de résistance du
sol lunaire, ; photographies, ; résultats, ;

Pyroxène (nom de minéral)

Pyroxferroïte (nom de minéral) ,
Polarisation de la lumière,

Quarantaine,

Radar, méthodes d'exploration de mars, ; de la Lune, ; de Vénus,
Radioactivité, datation par, ; découverte de, ; production de chaleur par, ; sur la Lune, ; éléments parent-fils
Radon, sur la surface lunaire,
Ranger, Programme,
Rayons cosmiques, *voir* Cosmiques
Rayons X : utilisés pour l'analyse de la surface lunaire, ; du Soleil,
Réactions nucléaires, dans les roches lunaires, ; dans le régolite, ; dans le Soleil
Réflecteur laser, mesure Terre-Lune
Régolite, ; *voir aussi* Sol lunaire
Roches lunaires : âges des, ; laves basaltiques, ; brèches, ; composition chimique des, ; analyses chimiques des, ; différences avec les roches terrestres, ; « âges d'exposition » des, sur la surface lunaire, ; gaz dans, ; des continents, ; magnétisme des, ; des mers, ; caractères

microscopiques des, ; minéraux des, nouveaux minéraux des, ; effets des radiations sur, ; radioactivité des, ; l'eau des,
Roche de la genèse,
« Roche Rouillée » lunaire,
Rover lunaire,

Rubidium, ; datation avec, ; perte de, par la Lune,

Russie, *voir* URSS,

San Andreas, Faille,
Saturne, (planète),
Schiaparelli, G.,
Séismes terrestres, ; causes des, ; destructions causés par, ; détection des, ; énergie des, ; localisations des, ; et constitution de la Terre, ; et marées,
Séismes lunaires, ; causés par des impacts artificiels, ; détection des, ; énergie des, ; localisation des, ; longs échos des, ; quantités de, ; périodicité des, ;
Séismomètres,
Sillons lunaires : exploration par Apollo 15, ; nature et origine des,
Sillon Hadley,
Sodium,

Soleil : particules atomiques venant de, ; composition du, ; distance de la Terre, ; éclipses de, ; effets sur la Terre, ; effets sur le régolite, ; énergie du, ; champ magnétique du, ; mouvement à travers la galaxie, ; réactions nucléaires dans le, ; origine du, ; activité ancienne, ; température du, ; « coup de... » sur la Lune, *voir* « Coup de Soleil »
Sol lunaire, ; anomalies d'âges du, ; étude des épaisseurs, ; carottage de, ; composition chimique du, ; , nature du, ; réactions chimiques dans, ; « âges d'exposition » du, ; « jardinage » du, ; gaz dans, « composé magique » du, ; étude des couches du, ; malaxage et répartition du, ; mouvement des roches dans le, ; origine

du, ; croissance de végétaux dans, ; fragments de roches dans, ; vent solaire piégé

dans, ; épaisseur du, effets des radiations dans,
« Sol Orange »,
Spinelle (nom de minéral) ,
Spoutnik 1,
Strontium,
« Subsatellite » lunaire,
Soufre,

Système solaire : âge du, ; caractéristiques
du, ; bombardement météoritique dans le, ;
origine du, ;

Télescope lunaire, observations avec,
Télescope à ultraviolet, observations à partir
de la surface lunaire,

Températures : internes de la Terre, ; dans le
régolite, ; sur la surface lunaire, ; de l'intérieur
de la Lune, ; sur le Soleil,

Terre : âge, ; atmosphère, ; noyau, ; gravité, ;
histoire, ; structure interne, ; chaleur interne, ;
la vie sur, ; champ magnétique de, ; formation
des montagnes sur, ; roches les plus anciennes
de la, ; océans de la, ; théorie des plaques
tectoniques, variétés de roches, ; marées de
la, ; volcans sur la, ;

Thorium, ,
Titane,
Tranquillityite (nom de minéral)
Tsiolkovsky, K. E.,
Tunguska, Événement,

Univers : âge et taille de, ; théories de son
origine,

Uranium,
Urey, H. C. , Loi de,
URSS (Russie) : Projet de test Apollo-
Soyouz, ; études de coopération spatiale avec, ;
premier satellite spatial, ; exploration lunaire

par, ; exploration planétaire par,

Vaisseau spatial Surveyor 3, ; résultats
d'études, ; retour de pièces par la mission
Apollo 12,

Vent solaire : enveloppes amorphes
produites par, ; primordial, ; récolte par les
astronautes, ; composition du, ; effets sur les
roches lunaires, ; à l'origine de l'atmosphère
lunaire, ; nature et origine du piégé dans le
régolite, ; vitesse du,

Vénus : composition de, ; cratères sur, ;
premières images de sa surface, ; champ
magnétique de, ; phases de, ; études radar de, ;
missions d'esondes spatiales vers,

Verne, J.,

Verre : formé par les impacts de météorites, ;
dans le régolite, ; dans la

« Motte Verte » (Apollo 15), dans le « Sol
Orange » (Apollo 17),

Vie : sur Terre, ; composés essentiels pour, ;
origine de, ; précurseurs de,

Vie extraterrestre : communication avec, ;
existence de, ; fictions à propos de, ; sur
Mars, ; sur la Lune, ; recherche de,

Viking : Programme, (mission Mars) , ;
premier arrivée sur sa surface, ; résultats
scientifiques, ; recherche de signes de vie, ;
sonde spatiale,

Volcans et activité volcanique : sur la
Terre, ; sur la Lune, ; sur Mars,

Wells, H. G.,

Wells, J. W.,

Yerkes, C. T.,

Zirconium,

