

Entretien avec Alan Binder, responsable de la mission Lunar Prospector

La Lune, cette illustre inconnue

Marsha Freeman s'est entretenue en novembre 1998 avec le Dr Alan Binder, responsable de la mission Lunar Prospector. Il donne un aperçu de nos connaissances en ce qui concerne la formation de la Lune et montre comment les résultats de Lunar Prospector ouvrent la voie à la colonisation de la Lune. En effet, cette sonde lunaire, qui a été lancée le 6 janvier 1998, a confirmé la présence d'eau gelée dans les régions polaires de la Lune, et cela en quantité plus importante qu'on ne le pensait.

Depuis janvier de cette année, l'orbite de Lunar Prospector a été abaissée à environ 25 kilomètres au-dessus de la surface de la Lune, afin de mieux percer les mystères de cette illustre inconnue.

Alan Binder avait été, en 1976, le responsable du programme Viking d'exploration de la planète Mars et a également été conseiller de l'Agence spatiale européenne. Il

a travaillé pour Lockheed et vient de fonder le Lunar Research Institute à Tucson (Arizona). Il est l'auteur de nombreux articles scientifiques, principalement dans les domaines de la géologie martienne et lunaire, la géochimie et la géophysique.



Alan Binder

Nombreux sont ceux qui croient que lorsque se sont terminées les missions du programme Apollo, au début des années 70, on avait appris tout ce qu'il fallait savoir sur Lune. Qu'en est-il vraiment ?

Alan Binder : La Lune, contrairement à ce que pensent la plupart des gens, n'est pas un endroit petit et il ne suffit pas de s'y rendre et ramener quelques pierres pour faire le tour de la question. Une partie du problème vient du fait que lorsque le programme Apollo a commencé, la Nasa a défini un objectif « attrayant » : comprendre l'origine et l'évolution de la Lune et des planètes. Toutefois, la science ne marche pas de façon magique où vous obtenez un élément d'information et puis soudainement, « Eurêka ! », vous comprenez tout. Il s'agit en fait d'un long processus dans lequel on accumule et analyse de nombreuses données pour ensuite arriver, lentement mais sûrement, à comprendre ce que vous étudiez.

On peut estimer que, depuis trois cents ans, des centaines de milliers de géologues ont étudié, ou étudient encore, la Terre, et il apparaît que l'on n'a pas fini d'apprendre des choses au sujet de notre planète. La Terre est évidemment assez complexe. Toutefois, il n'est pas facile de comprendre comment une planète quelconque se forme, évolue et où se trouvent ses ressources. La Lune a un diamètre d'environ un quart de celui de la Terre et sa surface est égale à l'ensemble du continent américain, ce qui représente une assez grande étendue. Imaginez le peu de connaissances que nous aurions de l'Amérique, si seulement six équipes avaient passé au grand

maximum trois jours de travail pour explorer six endroits du continent. On n'en connaîtrait pratiquement rien. Voilà où en était notre niveau de connaissance en ce qui concerne la Lune, après le programme Apollo.

L'évolution active de la Lune se termine à peu près dans le premier milliard d'années de son existence. L'histoire que l'on voit gravée dans ses roches et à sa surface remonte, en grande partie, à ses premiers cinq cents millions d'années. C'est le même nombre d'années qui s'est écoulé entre le Cambrien, marquant l'apparition de la vie sur la Terre, et l'époque actuelle – période que les géologues essaient de déchiffrer depuis trois cents ans. Ainsi, il nous faudra autant d'efforts pour percer les mystères de la Lune, lorsqu'elle était active, que pour comprendre ceux de la Terre. Sur notre planète, on trouve rarement des roches qui remontent au-delà de cinq cents millions d'années car elles ont été détruites par la tectonique des plaques, l'effritement, l'érosion, etc.

Il nous reste beaucoup à découvrir sur la Lune. C'est un endroit très complexe (certes pas autant que la Terre), et nous avons seulement gratté la surface.

Le programme Apollo a tout de même représenté un progrès...

Alan Binder : J'ai essentiellement une formation en astronomie. Je me destinais à devenir un astronome et à étudier les planètes. Quand l'ère des engins spatiaux a commencé, j'ai utilisé ceux-ci pour étudier les planètes et, en particulier, la Lune, au lieu de me servir de télescopes (même si j'ai encore grand plaisir à travailler avec ces derniers). Avant Apollo, nos connaissances lunaires étaient plutôt maigres, comme vous pouvez vous l'imaginer, avec seulement des télé-détections. Même si nous avions les Lunar Orbiter et Surveyor, il ne s'agissait là que de sondes rudimentaires. Le programme Apollo, avec ses échantillons et ses expériences à la surface, comme le réseau d'études sismiques et les mesures du flux de chaleur, a permis de progresser d'un pas de géant.

Une fois le programme Apollo terminé, nous avons pu établir des connaissances de bases sur les roches lunaires, la pétrologie, l'échelle des temps des événements lunaires et la structure interne de la Lune. On ne savait pas – et cette question

est importante – si la Lune avait un noyau. On ne savait pas non plus quel avait été la séquence exacte des événements avant l'impact Imbrium. Les débris de cet impact ont recouvert une grande partie de la Lune et les sites de prélèvements d'Apollo étaient proches d'Imbrium. On a pu ainsi véritablement commencer à déchiffrer les premiers cinq cents millions d'années de l'histoire lunaire.

Pendant Apollo, on a prélevé des échantillons dans Mare Tranquillitatis, Serenitatis, Imbrium ainsi qu'un peu dans Oceanus Procellarum. On a prélevé quatre ou cinq échantillons d'éléments volcaniques dans les mers et autant de roches qui ont été identifiées par des télé-détections. Ainsi, nous avons à peine gratté la surface en regardant les échantillons basaltiques des mers, sans parler des montagnes. En fait, on a eu un seul vrai échantillon de montagne (lors d'Apollo-16), alors qu'au moins 80% de la surface lunaire est faite de montagnes. Nous n'avons rien de la face cachée, rien des pôles. D'une certaine manière, nous venons juste de commencer.

N'était-ce pas la présence d'hommes dans ces missions Apollo qui a déterminé les sites d'alunissage ?

Alan Binder : En effet, les sites d'alunissage étaient dictés par le fait qu'il y aurait des hommes à la surface. Les sites devaient donc se trouver sur la face visible, pour permettre les communications avec la Terre, et se situer près de l'équateur. Toute cela a réduit notre champ d'action sur la Lune et c'est pour cela qu'elle a été très « sous-échantillonnée ».

L'une des choses que je voudrais faire est d'utiliser des véhicules automatiques pour ramener des échantillons lunaires. Dans le rapport intitulé *La science lunaire sur une base lunaire*, nous répertorions une centaine de sites d'échantillonnage. Ainsi, vous pouvez vous rendre compte de l'ampleur de ce que nous voulons entreprendre.

Nous n'avons que des échantillons qui viennent de six sites Apollo, plus trois échantillons de sites Luna. De plus, la nature a été généreuse avec nous : nous avons environ une demi-douzaine de météorites lunaires, mais le problème est que nous ne savons pas de quelle région elles proviennent. Nous devons donc entreprendre un échantillonnage systématique.

Qu'est-ce que les missions Apollo nous

ont véritablement apporté ?

Alan Binder : Durant l'ère Apollo, nous avons établi un réseau de surveillance sismique de quatre stations, toutes très rapprochées – à environ 1 000 km l'une de l'autre – sur la face visible de la Lune.

Nous avons détecté différents types de séismes lunaires. L'un d'eux vient des impacts des météorites. Toutefois, nous avons également observé des séismes extrêmement faibles à l'intérieur, entre 1 000 et 1 400 km de profondeur, qui sont causés par les interactions de marée entre la Terre et la Lune. Leur magnitude est de 0 à 0,5 sur l'échelle de Richter. Nous ne les sentions même pas mais ils existent.

De plus, il y a des tremblements tectoniques qui ont lieu dans le manteau supérieur et la croûte. Les plus forts séismes mesurés étaient de l'ordre de 3 ou 4 sur l'échelle de Richter – ce qui n'est pas très violent. On en a la preuve par une visualisation panoramique à haute résolution d'Apollo qui montre des failles causées par ces séismes lunaires.

L'un des problèmes est que nous n'avons des données sismiques lunaires que depuis six ans seulement. En Californie, par exemple, nous avons beaucoup de tremblements de terre dont la plupart ne sont que de magnitude 3 ou 4. Ceux qui créent des dégâts, de magnitude 6 ou 7, on en a que tous les trente ou quarante ans. Nous n'avons pas été assez longtemps sur la Lune pour savoir s'il y a des phénomènes sismiques significatifs.

Sur la Terre, la magnitude maximum que l'on peut avoir est d'environ 8,5 sur l'échelle de Richter, tout simplement parce que les roches ne peuvent pas supporter plus de pression. Elles se cassent à cette magnitude. C'est surtout le cas lorsque vous avez des séismes qui ont lieu sur le bord d'une plaque tectonique, où les roches sont déjà fracturées et relativement fragiles.

Le tremblement de terre qui s'est produit au début du siècle dernier dans la vallée du Mississippi était un séisme intraplaque. C'est le plus fort séisme jamais mesuré. Bien sûr, nous n'avons pas d'appareil de mesure à cette époque mais les sismologues peuvent dire par les effets causés qu'il était bien plus important que le tremblement de terre de San Francisco. C'était probablement de l'ordre de 9. Lorsque vous êtes au centre stable des plaques tectoniques, les

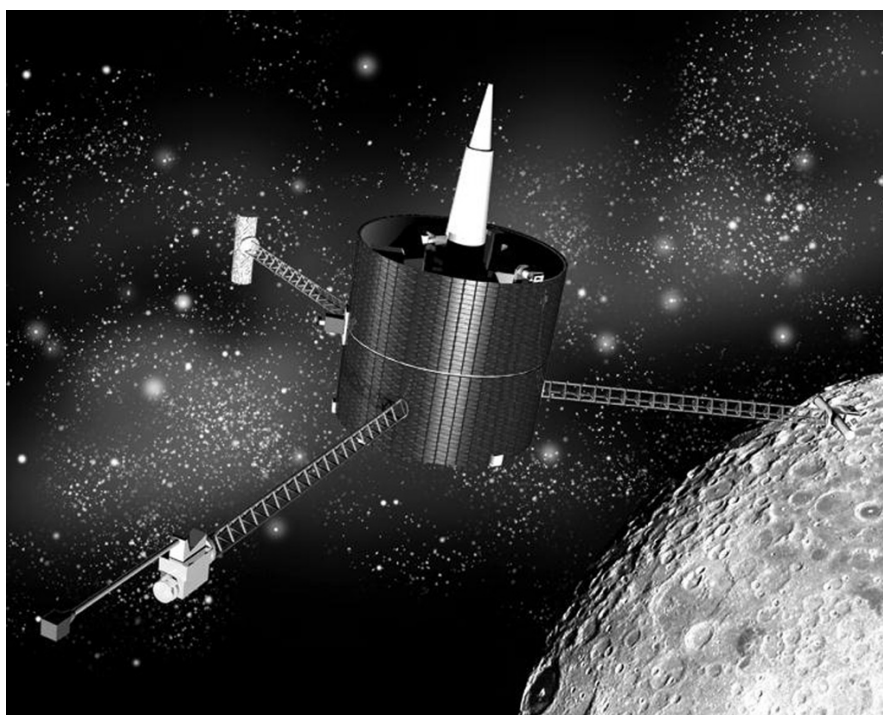
roches sont bien plus résistantes et il faut beaucoup plus de pression pour les casser. Ces séismes intraplaques se produisent peu fréquemment mais sont les plus désastreux.

Les séismes que l'on observe sur la Lune sont similaires en caractéristiques à des séismes intraplaques. Il est possible qu'il y ait, de temps en temps, des séismes de très grande amplitude sur la Lune. Le fait est que les roches lunaires sont plus dures que les roches terrestres d'un facteur un à deux, à cause de l'absence d'eau et d'air. Mon hypothèse est que l'on pourrait avoir des séismes lunaires de magnitude 9, mais c'est seulement une extrapolation audacieuse.

Les séismes lunaires durent une bonne heure contrairement aux séismes terrestres qui s'arrêtent au bout de quelques minutes. En effet, étant donné qu'il n'y a pas d'air ou d'eau qui puisse rapidement amortir l'énergie et la dissiper, les vibrations sismiques de la Lune se propagent longtemps. Si ces séismes se produisent bel et bien sur la Lune, vous pouvez imaginer quels effets destructeurs cela aurait sur une base ou une colonie lunaire. Nous ne connaissons toujours pas ce facteur de risque.

Lors des missions Apollo-15, 16 et 17, le module de service a emmené des instruments scientifiques pour cartographier la Lune avec des rayons gamma, des rayons X et par magnétométrie. Comme tous les sites d'alunissage étaient proches des régions équatoriales, avec les orbites à faible inclinaison des modules de commande et de service, nous avons au mieux cartographié à peu près 20% de la surface. Toutefois, nous avons besoin d'une carte complète pour commencer à avoir un point de vue d'ensemble. La sonde Lunar Prospector est en train de réaliser cela. Nous avons presque terminé la cartographie en utilisant les cinq techniques que j'ai retenues. Il y a encore environ sept techniques de cartographie en orbite que je voudrais mettre en œuvre pour compléter la carte.

Le résultat de Lunar Prospector qui a, sans aucun doute, retenu la plus grande attention, est qu'il y aurait de la glace sur les pôles nord et sud de la Lune, et en plus grande quantité que ce que l'on avait pensé auparavant. Pourquoi croyez-vous de façon si affirmative qu'il y a de la glace aux pôles alors que Lunar Prospector n'a détecté que de l'hydrogène et non de la



L'un des objectifs de la sonde Lunar Prospector, lancée en janvier 1998, a été de cartographier de manière précise l'ensemble de la surface lunaire. Elle a également confirmé la présence d'eau décelée en grande quantité aux deux pôles.

glace ? Est-ce que cette extrapolation a été acceptée par la communauté scientifique ?

Alan Binder : Nous sommes assez convaincus qu'il s'agit d'eau gelée. Mais il y a une différence entre un fait scientifique et une opinion personnelle. Nous n'avons pas de fait scientifique pour l'instant. Même si nous pensons avoir de bons arguments en faveur de cette hypothèse, il ne s'agit que d'une extrapolation de nos données et pas d'un fait.

Harrison Schmitt [un géologue et astronaute des missions Apollo] et d'autres se sont demandés s'il pouvait s'agir d'autre chose. Est-ce que l'hydrogène mesuré par Lunar Prospector aurait pu être déposé par des vents solaires ?

Qu'avons-nous réellement trouvé ? Lunar Prospector a détecté de l'hydrogène, pas de l'eau. Nous savons qu'il y a un excès d'hydrogène aux régions polaires car nous disposons d'une résolution suffisamment fine pour l'observer. La quantité maximale d'hydrogène a été détectée dans les régions [polaires] où se trouvent des cratères en permanence dans l'obscurité. Nous savons que les vents solaires ont déposé de l'hydrogène dans le régolithe, ou le sol, de la Lune. Si vous prenez

un échantillon standard ramené par les missions Apollo, vous trouvez de l'ordre de 50 à 100 parties par million (ppm) d'hydrogène dans le régolithe. Nos mesures sont tellement précises que, lorsque nous aurons terminé cette mission, nous serons capables de cartographier la distribution d'hydrogène dans le régolithe sur toute la Lune, et cela à des niveaux de 50 à 100 ppm.

Donc, on aurait une valeur d'équilibre car le vent solaire continue à déposer de l'hydrogène sur le sol pendant qu'une partie de l'hydrogène se perd. Selon Harrison Schmitt cette valeur d'équilibre de 50 à 100 ppm d'hydrogène changerait aux pôles : plus il fait froid, plus cette valeur devrait être élevée [ainsi, on devrait s'attendre à trouver plus d'hydrogène aux pôles mais pas nécessairement de la glace]. J'ai travaillé avec des chimistes qui m'ont assuré que tel n'était pas le cas. Toutefois, on ne trouve rien à ce sujet dans la littérature scientifique et je ne peux pas le vérifier.

Bill Feldman [du laboratoire de Los Alamos] et moi-même avons trouvé que les données du niveau énergétique intermédiaire, ou le niveau d'énergie épithermique des neutrons [mesurés par Lunar Pros-

pector], montrent clairement qu'il y a là un excès d'hydrogène. Toutefois, on devrait constater la même chute pour les neutrons rapides, ou le flux de neutrons à haute énergie [en présence d'hydrogène], ce qui n'est pas le cas [Figure 1]. La seule explication, c'est que l'hydrogène se trouve enfoui à environ 30 à 40 cm de la surface. Les neutrons rapides viennent seulement des 30 à 40 cm sous la surface, et s'il y avait de l'hydrogène en quantité importante, alors vous verriez une chute dans le flux de neutrons rapides au-dessus des pôles. Les neutrons épithermiques que nous voyons viennent d'au moins 1 m de profondeur. Il n'y a pas d'augmentation de l'hydrogène dans les vingt premiers centimètres du régolithe ; nous l'observons à un niveau plus profond.

Il est intéressant de mentionner que des scientifiques ont constaté la même chose en ce qui concerne des observations radars de Mercure qui ont indiqué la présence d'eau à 30 cm sous le sol. Il est apparu que l'on pouvait également faire des observations radars, depuis la Terre, dans les régions polaires de la Lune qui sont en permanence dans l'ombre grâce à la libration, c'est-à-dire l'inclinaison de plus ou moins 6° de la Lune par rapport à la Terre. Même si le Soleil n'illumine pas ces cratères, nous pouvons en partie les scruter avec des radars depuis la Terre. Ces observations radars ne montrent pourtant aucune trace d'eau. Comment pouvons-nous l'expliquer ?

Il existe en fait une différence entre le sol de Mercure et celui de la Lune : le sol de Mercure est très pauvre en oxyde de fer alors que le sol lunaire en est relativement riche. Or les radars ne pénètrent pas très bien les sols riches en oxyde de fer. Ainsi, contrairement à Mercure, on ne peut pas regarder très profondément dans le sol de la Lune à des longueurs d'onde radar.

Nous avons donc trois séries d'observations qui montrent qu'il s'agit bien de dépôts de glace sous la surface de la Lune : celles de Mercure qui indiquent la présence de glace à 30 cm en dessous du sol, nos mesures des neutrons qui montrent que la glace se trouve enfouie à 30 cm en dessous du sol et le fait que les observations radar à partir de la Terre ne peuvent pas aller plus loin que 30 cm de profondeur dans ce sol lunaire relativement riche en fer.

Si c'était le vent solaire qui était

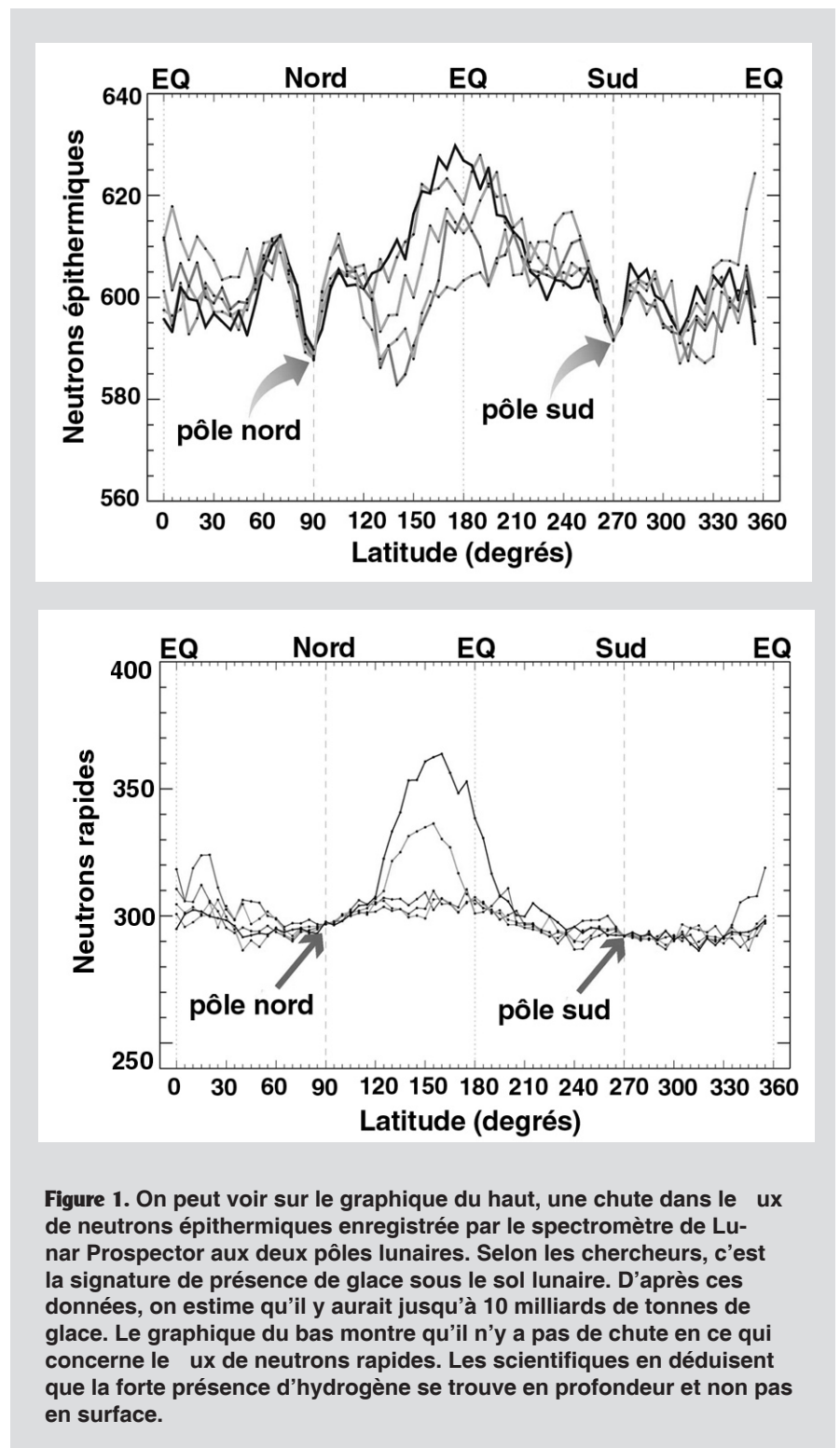


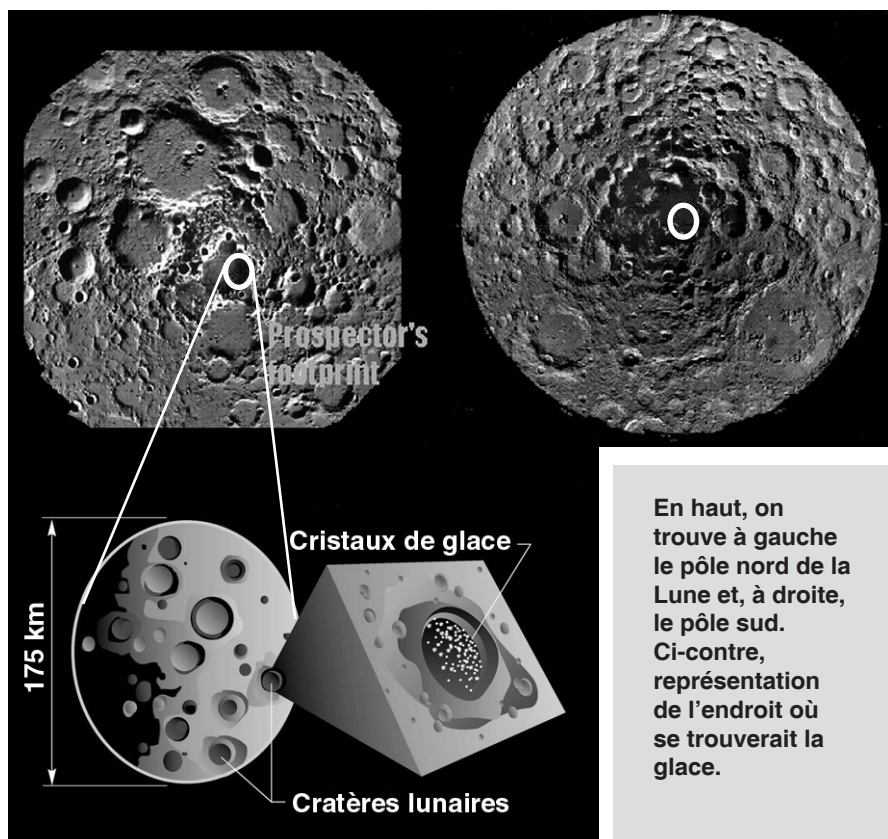
Figure 1. On peut voir sur le graphique du haut, une chute dans le flux de neutrons épithermiques enregistrée par le spectromètre de Lunar Prospector aux deux pôles lunaires. Selon les chercheurs, c'est la signature de présence de glace sous le sol lunaire. D'après ces données, on estime qu'il y aurait jusqu'à 10 milliards de tonnes de glace. Le graphique du bas montre qu'il n'y a pas de chute en ce qui concerne le flux de neutrons rapides. Les scientifiques en déduisent que la forte présence d'hydrogène se trouve en profondeur et non pas en surface.

responsable de l'excès d'hydrogène, comme le propose Harrison Schmitt, alors nous devrions observer des dépôts localisés dans la partie supérieure du régolithe et non pas sous la surface. S'il avait raison, on devrait mesurer une chute dans le flux de neutrons rapides similaire à celui du flux de neutrons épithermiques, et ce n'est pas le cas. Nous sommes donc assez convaincus que nous avons affaire à

de l'eau gelée.

Vous semblez avoir confiance en vos résultats.

Alan Binder : Quand nous rendons public les résultats de Lunar Prospector, nous restons toujours prudents. Des télédétections ne peuvent jamais prouver quoi que ce soit à 100%. Elles donnent une forte indication mais nous devons aller à la surface



et mesurer. C'est la prochaine étape : aller avec un *rover* ou un autre *lander* et réaliser des mesures en forant dans le régolithe à environ 1 m de profondeur. De cette manière, nous aurons des échantillons et pourrons voir s'il s'agit réellement d'eau. Même si j'en suis personnellement convaincu, on aura la preuve que lorsque l'on ira *in situ* faire des mesures.

Que pensez-vous apprendre de plus quand Lunar Prospector opérera à une altitude plus basse ?

Alan Binder : Dès que Lunar Prospector aura terminé sa première mission au début de 1999, nous avons l'intention d'amener la sonde à une orbite se situant en moyenne à 25 km au-dessus de la surface [c'est la cas depuis janvier 1999], ce qui nous permettra d'affiner nos mesures concernant la présence de glace lunaire.

D'abord, quand on survole une région, le spectromètre à neutrons balaye une surface de 320 km de côté. Cependant, nos données montrent des régions en forme de trapèze avec une résolution de 60 km. Avec une orbite à 25 km, nous allons voir des détails de l'ordre de grandeur de 10 à 15 km. Nous pourrons voir très précisément où se situent les dépôts d'hydrogène et déterminer s'il existe des régions qui restent en permanence dans

l'obscurité.

Ensuite, en s'approchant de la Lune, nous pourrons commencer à voir certaines choses s'il y a de l'hydrogène dans les quarante premiers centimètres de la surface. Nous devrions, dans un premier temps, regarder s'il y a une chute dans le flux de neutrons rapides. S'il n'y en a pas, si nous l'observons que dans le flux des neutrons épithermiques, alors cela renforcera notre thèse qu'il s'agit réellement de glace et non d'hydrogène déposé par le vent solaire.

Ce qui nous intrigue toujours, c'est de savoir d'où vient la Lune. Que pensent les scientifiques aujourd'hui ? Il semble que la théorie de la collision – le Big Splash – soit en vogue.

Alan Binder : Tout au long des siècles passés, il y a eu différentes théories sur la formation de la Lune et sur son origine. Ces théories, comme beaucoup d'autres choses, même en science, ont été à la mode puis se démodent.

A certaines époques, on pensait que la Lune était un corps capturé [venant d'un autre endroit du système solaire], et tout le monde le croyait car les faits semblaient pointer dans cette direction. Avant cela, on croyait au concept de fission [la Lune serait un morceau arraché de la Terre], car cela semblait raisonnable. Ainsi, ce qui est à la mode

se démode.

Aujourd'hui, il est à la mode de croire au modèle de la grande collision. D'où vient cette théorie ? Les données d'Apollo montraient clairement que le matériau constitutif de la Lune était presque identique à celui du manteau terrestre. Les rapports isotopiques des éléments comme l'oxygène, le soufre et la silice sont exactement les mêmes pour les roches lunaires que celles provenant du manteau terrestre. Si vous étudiez les météorites qui viennent de Mars, les astéroïdes ou le matériau cométaire, chaque type de corps a une composition isotopique particulière et très différente par rapport aux autres.

Le grand problème, c'est que la Terre possède un noyau gigantesque : 30% de la masse terrestre est concentré dans le noyau ferreux. Sur la Lune, le noyau constitue 1 ou 2% de la masse totale. Ainsi, nous avons deux corps avec des compositions identiques pour les silicates et leur manteau ; pourtant, l'un a 30% de fer et l'autre a, au mieux, 1 ou 2% de fer. Comment expliquer cela ?

La similarité de composition nous indique que le matériau constitutif de la Lune vient, d'une manière ou d'une autre, de la Terre. La façon la plus simple d'expliquer pourquoi la composition ferreuse est aussi différente, c'est d'imaginer que la Lune s'est formée après que le noyau de la Terre se soit constitué.

A l'époque de Charles Darwin, on considérait que la Terre s'est mise à tourner très rapidement [pendant sa formation] et que la Lune s'est détachée. Malheureusement, ce processus semble être impossible d'un point de vue dynamique. Certains de mes collègues, à commencer par Bill Hartmann et Don Davis au Lunar Research Institute de Tucson, ont également suggéré qu'un corps de la taille de Mars soit rentré en collision avec la Terre, projetant dans l'espace le matériau qui va constituer la Lune. Plus ces gens travaillent sur cette théorie de collision, plus la dynamique devient improbable.

Au début, il fallait un corps de la taille de la planète Mars. J'ai du mal à croire qu'un corps de la taille de Mars se promenait dans le système solaire au début de sa formation. Mais aujourd'hui, on pense que ce corps devait être deux fois plus grand que Mars. Chaque fois que l'on étudie la dynamique, on se rend compte qu'il faut un corps toujours plus grand.

L'un des arguments que l'on opposait au concept de la fission, c'était que personne ne voyait comment, en terme de dynamique, la Terre aurait pu éjecter ce qui allait devenir la Lune. Si vous prenez le moment angulaire du système Terre-Lune aujourd'hui, il est bien trop faible par rapport à la vitesse estimée au moment de la séparation. Le moment angulaire se conserve dans un système. Maintenant, si vous avez un corps gigantesque qui percute la Terre, le même problème de moment angulaire persiste. Avec la théorie de la collision, on ne peut pas expliquer le moment angulaire actuel [en fonction du] système qui aurait dû exister à cette époque.

Lorsque vous avez un nouveau modèle qui semble répondre aux questions, plus vous creusez et plus vous trouvez, hélas, des contradictions. Je n'ai personnellement aucune idée de comment la Lune a été formée. Je sais que le matériau vient de la Terre, mais comment il en a été extrait, cela je n'en sais rien.

Est-ce que le fait que Lunar Prospector ait identifié un petit noyau dans la Lune, réduit le nombre des théories qui pourraient expliquer l'origine de la formation de la Lune ?

Alan Binder : Oui. Le noyau est l'une des clefs de l'origine et de l'histoire de la Lune. On considère que si la Lune a un noyau, alors elle ne provient pas du manteau terrestre [comme la théorie de la collision le nécessite]. Comment arrivons-nous à cette affirmation ? Il existe des éléments que nous qualifions de « sidérophiles », c'est-à-dire qu'ils aiment le fer, comme le chrome, le platine, l'or, etc., qui ont tendance à aller là où se trouve du fer. Partout où vous trouvez un gros morceau de fer, vous allez trouver ces autres éléments. Quand on ramasse un morceau de roche terrestre, provenant de la surface ou du manteau, on y trouve toujours des éléments sidérophiles. Leur présence est infime et calculée en parties par milliard. Toutefois, ils ont des proportions très distinctes, c'est-à-dire que les rapports du platine à l'or, au chrome, au fer, reflètent une configuration caractéristique.

Au moment de sa formation, le noyau terrestre a concentré, en grande partie, les éléments sidérophiles du manteau, en laissant une configuration caractéristique. Si la Lune s'est formée à partir du manteau de la

Terre après que le noyau se soit formé [ce qui semble être le cas puisque le noyau de la Lune est bien plus petit], alors on s'attendrait à retrouver la même configuration caractéristique d'éléments sidérophiles des roches terrestres dans les roches lunaires ; mais ce n'est pas le cas.

Nous avons trouvé qu'il y avait une seconde différenciation des éléments sidérophiles dans la Lune. On aurait pu s'y attendre car la Lune, selon toute vraisemblance, est née quand le système solaire était encore en formation et que les choses continuaient à évoluer. En conséquence, la formation du noyau terrestre n'était probablement pas terminée et, même si la Lune a été éjectée ou arrachée de la Terre, on aurait donc dû avoir une composition légèrement différente entre les roches terrestres et les roches lunaires. Quand je dis « légèrement différente », nous avons mesuré que seulement 0,5 ou 1% de captation supplémentaire par le fer dans le noyau lunaire pouvait causer ces différences entre les caractéristiques sidérophiles de la Terre et la Lune. Si les mesures de Lunar Prospector (et les mesures sismiques qui, espérons-le, suivront) montrent que la masse du noyau est de 2 ou 3%, alors nous aurons une caractéristique très différente.

Tout cela est bien beau mais repose sur de nombreuses suppositions. Il s'agit de savoir si l'on suppose que des gouttelettes de fer ont été répandues uniformément à la surface de la Lune et se sont ensuite concentrées dans le noyau ou si elles se sont formées par la réduction d'oxyde de fer. Il y a beaucoup de « si » et de « mais ». C'est pourquoi la mode change. Je peux en tous cas vous garantir une chose : si le noyau se révèle être 2 ou 3%, les scientifiques vont retourner à leurs modèles et décider quels paramètres sont importants et peuvent changer leurs résultats. On peut élaborer des modèles théoriques qui pourraient expliquer les données réelles que nous avons en main.

Laissez-moi vous raconter une petite histoire. Avant d'établir que les météorites SNC (c'est-à-dire shergottites, nakhlites et chassignites, appelées ainsi d'après le nom des régions où elles sont tombées sur Terre) étaient de Mars, les dynamiciens – les personnes qui étudient les phénomènes de collision – avaient juré qu'il était impossible que des météorites s'éjectent de la Lune ou de Mars. Quand les

météorites SNC ont été étudiées et que l'on a pensé qu'elle pouvait venir de Mars, les dynamiciens disaient « non, non, non, c'est tout simplement impossible ». Un de mes amis et collègue fait partie de ces personnes et il me disait : « Tu sais, je viens juste de finir ces calculs et il y a une petite zone sur le diagramme de pression et de force où l'on pourrait potentiellement avoir des météorites qui s'éjectent de Mars. Mais je suis sûr que je serai capable de montrer que ce n'est pas le cas et que cette toute petite possibilité se dissipera. »

A peu près un mois plus tard, il a été montré de façon concluante que les rapports isotopiques des gaz rares qui étaient emprisonnés dans les météorites SNC étaient identiques aux mesures atmosphériques effectuées par les missions Viking. La communauté scientifique a dit : « Mon Dieu, ces choses viennent de Mars. » Cette petite zone sur le diagramme que ce théoricien s'efforçait de faire disparaître pour montrer qu'il n'était pas possible d'avoir des météorites venant de Mars, cette petite zone s'est mise à grandir. Il est vraiment devenu très facile d'arracher ces choses de la planète.

Dans tous ces calculs, vous êtes limités par ce que vous savez déjà et défiés par les choses que vous ne savez pas. Quand vous avez davantage de données, vous devez réajuster ces problèmes. C'est l'histoire de la science.

On dit que les vieilles théories scientifiques disparaissent lorsque les vieux scientifiques meurent.

Alan Binder : J'ai trouvé que certaines des vieilles théories – qui étaient intuitives chez les physiciens d'il y a cent cinquante à deux cents ans, alors qu'ils avaient peu de données – se sont très souvent révélées exactes. Ces théories ne sont plus en vogue car nous améliorons notre compréhension et on les tourne en dérision. En fait, le concept de base était souvent correct mais pas les détails. Ainsi, contrairement à beaucoup de personnes, j'ai tendance à considérer les anciennes idées avec plus d'attention car certaines choses relèvent en quelque sorte de l'évidence.

A titre d'exemple, prenons la Lune. L'idée que la Lune venait de la Terre remonte, comme je l'ai dit, à Darwin il y a un siècle et demi. Cette théorie était assez répandue car elle expliquait pourquoi il n'y avait pas de noyau dans

la Lune, du moins pas significatif, et aussi pourquoi la densité du manteau terrestre était presque identique à celle de la Lune. C'était séduisant et tout le monde était enclin à le croire.

Par la suite, cette théorie a perdu la faveur des scientifiques au profit d'une idée selon laquelle la Lune aurait été capturée. De nombreux scientifiques partageaient cette idée car elle expliquait bien beaucoup de choses à propos de la Lune. En fait, [le planétologue] Harold Urey défendait avec acharnement cette théorie juste avant l'ère des missions Apollo. L'une des raisons pour laquelle cette théorie a pu avoir tant de succès, c'est que nous n'avions aucune information sur la composition de la Lune, car nous n'avions aucune base pour effectuer des mesures.

Dès que nous avons disposé des roches d'Apollo (en réalité, cela nous a pris un certain temps pour déchiffrer l'information et la comprendre), on a tout à coup découvert que la Lune avait presque la même composition que le manteau terrestre, balayant ainsi complètement le modèle de la capture. En effet, si la Lune avait été formée ailleurs dans le système solaire et capturée par la Terre, leur composition aurait dû être radicalement différente et ce n'était pas le cas. Ainsi, nous avons abandonné les modèles de capture et les modèles d'accrétion du noyau pour revenir au concept général selon lequel le matériau provient d'une façon ou d'une autre de la Terre.

D'un autre côté, même si le modèle de la capture a été abandonné en ce qui concerne la Lune à cause des résultats d'Apollo, nous avons la forte conviction que Phobos et Deimos ont été capturés autour de Mars. Quand j'étais encore étudiant, la possibilité d'avoir des corps capturés était considérée impossible. Il n'y avait personne qui était capable d'expliquer les dynamiques, et donc on supposait que les lunes s'étaient formées en même temps que les planètes. Maintenant, tout le monde croit, sans se poser de questions, qu'il s'agit d'astéroïdes capturés. Encore une fois, il y a de nombreux concepts qui sont en vogue et cela m'amuse toujours de voir avec quelle rapidité les scientifiques passent d'un concept à l'autre.

Je peux vous donner un autre exemple. Au début du programme Apollo, le concept dominant considérait que la Lune s'était, d'une manière ou d'une autre, formée par accrétion et que,

d'après certaines des premières observations des roches lunaires, seules les quelques centaines de kilomètres en dessous de la surface avaient été en fusion. Ces observations n'étaient pas correctes mais ce modèle était pourtant profondément ancré dans l'esprit d'une grande partie de la communauté scientifique travaillant sur la Lune. Si vous aviez posé la question à des scientifiques, la plupart vous auraient répondu : « La Lune n'a été en fusion que sur les premières centaines de kilomètres. » Nous sommes peu à avoir défendu l'idée que tel n'était pas le cas et que la Lune avait été, au tout début, totalement en fusion. Je pense que cette idée repose sur des preuves

« Je suis absolument convaincu que notre destin, en tant que civilisation, est d'aller dans l'espace et que nous coloniserons la Lune, Mars et peut-être d'autres planètes. Et que finalement nous pourrions même atteindre les étoiles. »

solides. Ceux d'entre nous qui l'ont défendu se sont faits hués.

En adoptant la théorie de la formation de la Lune par une collision majeure, il a fallu admettre en conséquence que la Lune avait été, au départ, complètement en fusion. Aujourd'hui, tous les scientifiques acceptent cela sans même penser à toutes les raisons pour lesquelles ils croyaient auparavant que la Lune n'avait pas été totalement en fusion. Ils ne se posent même plus la question. Si, tout à coup, quelqu'un détermine que c'est cela qui est la mode, il existe une grande propension à le suivre.

Comment ce que nous apprenons sur la Lune peut nous aider à comprendre les autres corps du système solaire ?

Alan Binder : Quand nous allons sur la Lune, nous pouvons étudier à quoi ressemblait la Terre dans les premiers temps de son développement. De la même manière, en étudiant la Lune,

nous comprendrons mieux Mars et les autres planètes terrestres.

Chacune de ces missions apporte une pièce supplémentaire au puzzle. Je suis sûr que d'ici cinquante ans, lorsque je l'espère nous aurons effectué un grand nombre d'explorations et établi une colonie là-haut, nous trouverons sans doute qu'une grande partie de nos connaissances issues de l'ère Apollo n'étaient pas très précises.

Si vous prenez les planètes terrestres comme la Terre, Mercure, Venus, Mars, et parmi lesquelles on peut inclure dans ce contexte la Lune et même les astéroïdes, chacun de ces corps ont connu des degrés différents d'évolution parce qu'ils sont de tailles différentes. L'évolution de la Lune s'est arrêtée il y a un milliard d'années. Celle des astéroïdes s'est arrêtée encore plus tôt car ils étaient plus petits. Mercure était plus grande et a sans doute connu un développement historique sensiblement plus long. Sur une moitié de la surface martienne, on trouve d'anciens cratères, et sur l'autre moitié se développe une intense activité avec des plaines volcaniques et d'énormes volcans. La Terre et Venus sont de très grandes planètes et sont toujours en évolution active.

Avant que l'on commence l'exploration de ces planètes, nous avions des données que d'une seule planète : l'étrange planète sur laquelle nous vivons. Elle a une atmosphère épaisse, certes pas autant que Venus mais néanmoins assez épaisse et qui s'est *considérablement* modifiée par l'activité biologique. Nous avons énormément d'eau, ce qui constitué une différence importante dans l'évolution de la Terre, et nous avons la tectonique des plaques. Vous ne trouvez aucune de ces choses sur les autres planètes. La Terre est ainsi une planète atypique, et pourtant, c'est de là que nous devons partir quand on explore le système solaire. Chaque parcelle de connaissances que nous gagnons à propos de Mars, Mercure, la Lune, les astéroïdes, nous en dit plus sur comment les planètes évoluent.

En quoi la mission Lunar Prospector contribue-t-elle à l'établissement d'une colonie sur la Lune ?

Alan Binder : Je suis absolument convaincu que notre destin, en tant que civilisation, est d'aller dans l'espace et que nous coloniserons la Lune, Mars et peut-être d'autres planètes. Et que finalement nous pourrions même

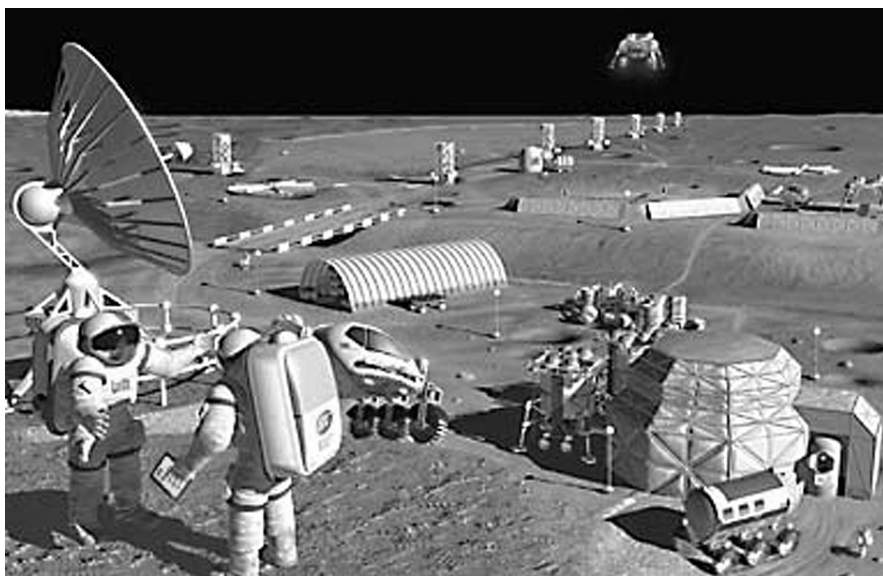
atteindre les étoiles. Les recherches que je mène avec d'autres ouvrent véritablement la porte à une utilisation de la Lune par l'homme.

Vous noterez que nous avons appelé cette sonde « Lunar Prospector » et non pas « Lunar Explorer ». En effet, nous voulions faire savoir à la population que nous cherchions réellement des ressources, des choses qui peuvent être utiles à l'espèce humaine. C'est la signification de Prospector.

Tout ce que nous comptons faire sur la Lune sera facilité s'il y a de l'eau là-bas. Quand je travaillais à Houston au Johnson Space Center, pour le compte de Lockheed, je m'occupais de la planification de missions habitées vers Mars et la Lune (ce qui a représenté l'activité principale de ma carrière). A cette époque, nous supposions qu'il n'y avait pas d'eau car nous n'avions aucune raison de croire qu'il y avait de l'eau gelée sur la Lune. Nous savions comment construire une base lunaire et établir une colonie mais, sans eau, cela devenait extrêmement cher.

La présence d'eau gelée sur la Lune rend plus facile l'établissement d'une base lunaire par un facteur 100. L'eau est un facteur rendant la chose possible. L'eau est importante pour les systèmes d'alimentation en oxygène ainsi que pour extraire du carburant avec l'hydrogène et l'oxygène. La Lune devenant ainsi un entrepôt de carburant, la porte est ouverte pour l'exploration et la colonisation non seulement de la Lune mais aussi du système solaire. Trouver de la glace sur la Lune est une découverte sensationnelle. Elle nous apprend peu de choses sur la Lune car l'eau qui s'y trouve a été principalement amenée par des comètes. Nous pourrions peut-être apprendre des choses sur l'histoire des impacts cométaires mais l'essentiel est que nous pourrions avoir des hommes qui vivront et travailleront sur la Lune.

Je pense qu'à l'avenir l'exploration lunaire devra être faite de façon commerciale. De ce point de vue, Lunar Prospector a été un succès complet pour montrer que c'était possible. Il est vrai qu'il n'a pas été financé avec des fonds privés mais l'objectif de Lunar Prospector était de démontrer que ce serait possible. Nous ne l'avons pas entrepris seulement pour recueillir des données scientifiques sur la Lune, même si c'était notre objectif principal.



Selon Binder, la présence d'eau gelée sur la Lune rend plus facile l'établissement d'une base lunaire par un facteur 100.

C'est un groupe important de volontaires qui a démarré Lunar Prospector afin de montrer qu'il est possible d'effectuer de telles missions bon marché et sans une lourde bureaucratie, de recueillir des informations de bonne qualité à un coût très faible. En montrant que l'on pouvait réaliser cela de façon commerciale, on voulait faire naître un nouvel intérêt dans la science lunaire, et, espérons-le, un intérêt dans l'établissement de l'homme sur la Lune.

Par « commercial », j'entends que l'engin spatial et les instruments seraient financés par des capitaux privés et qu'ensuite les données seraient vendues au gouvernement, aux universités, à l'Agence spatiale européenne ou à n'importe qui désirant les acquérir. Le programme Discovery de la Nasa est un programme d'« achat de données », c'est-à-dire qu'elle achète à l'avance les données. Il s'agit donc encore d'un programme soutenu par la Nasa.

Ceux d'entre nous qui veulent une exploration lunaire commerciale sont assez satisfaits du fait que la Nasa n'est pas intéressée par la Lune. En réalité, cela nous rend la tâche plus facile pour avancer avec une approche commerciale. Nous avons beaucoup travaillé depuis plusieurs années, comme vous le savez, pour arriver à notre objectif. Maintenant, tout le monde sait que de telles missions ont une viabilité commerciale. Le Congrès prépare une loi pour encourager cela, notamment par des exonérations fiscales pour les

compagnies qui entreprennent des activités commerciales dans l'espace.

Nous sommes en train de mettre en place un projet de société commerciale afin d'établir une base lunaire. Mon institut et l'un de mes collègues du Sandia National Laboratory ont travaillé sur la seconde mouture d'un document qui s'intitule « Projet d'architecture d'une base lunaire commercialement viable ». Je crois fermement que nous allons montrer la voie pour l'établissement d'une base lunaire et l'exploration en profondeur de la Lune, habitée aussi bien que non habitée, et que ce sera le commencement d'une colonie lunaire.

Dans l'intervalle, nous allons poursuivre des missions d'exploration non habitées car nous avons clairement besoin de plus d'informations. Nous avons besoin de vérifier qu'il s'agit d'eau gelée parce que l'on ne peut pas établir une base lunaire sans en avoir la certitude. Il y a beaucoup à faire.

La Nasa est très intéressée par Mars et, bien sûr, Pathfinder et Sojourner ont reçu une énorme publicité. Mais la Nasa s'est relativement peu mobilisée pour promouvoir Lunar Prospector car ils n'ont que peu d'intérêt pour ce qui se passe sur la Lune. C'est ce que je veux changer avec mon agence.

En tant que scientifique, j'aime beaucoup travailler sur l'origine et l'évolution de la Lune. Mais la chose essentielle, c'est que les données que nous obtenons vont nous aider à déterminer comment construire une civilisation lunaire.

n