

# Pourquoi retourner sur la Lune ?

**Hugues Chenet**, Hitoshi Mizutani (1), Satoshi Tanaka  
Institute of Space and Astronautical Science / Japan Aerospace Exploration Agency (ISAS/JAXA)  
Yoshinodai 3-1-1, Sagami-hara-shi, Kanagawa-ken, 〒 229-8510  
Tel. : +81(0)42-759-8200 - Fax. : +81(0)42-759-8516  
E-mail : hugues@planeta.sci.isas.jaxa.jp

(1) Now at: Newton Press Inc., Nishi-Shinjuku 2-6-1, Shinjuku-ku, Tokyo, 163-0207 Japan

## Résumé :

La connaissance de la Lune, de sa formation et de son évolution, doit beaucoup au programme Apollo, qui naquit dans l'élan de la course stratégique à l'espace, priorité nationale américaine de l'époque ; mais qu'on ne s'y trompe pas, le contenu scientifique du programme était lui aussi très ambitieux. En plus de l'éclat médiatique planétaire des premiers pas de N. Armstrong et W. Aldrin sur le sol lunaire, les expériences scientifiques menées lors des missions Apollo furent un réel succès qui permit de bouleverser la vision et la compréhension pre-Apollo de notre satellite. Cependant, le portrait dressé à l'issue des missions (structure interne et surface), ne constitue qu'une ébauche.

Trente ans après, seules deux missions américaines en orbite ont apporté dans les années 90 de l'eau au moulin de la science lunaire et complété le schéma du début des années 80. Mais la connaissance de la Lune et de son origine, même si radicalement différente de ce qu'elle était en 1968, est encore incomplète aujourd'hui. Dans les prochaines années, plusieurs missions indienne, japonaise, chinoise et américaine vont à nouveau explorer la surface lunaire depuis leur orbite, et devraient préciser la cartographie sélénographique, topographique et minéralogique, ainsi que déterminer avec précision le champ de gravité de la Lune, qui renseigne sur la structure interne. Mais pour aller plus loin en profondeur et enfin connaître la nature du centre de la Lune et de l'éventuelle différence entre les faces cachée et visible, il est indispensable d'installer à nouveau des capteurs à la surface même de la Lune. Parmi les types d'instruments requis, la communauté est unanime pour conduire de nouvelles expériences de sismologie et de flux de chaleur, en plus de carottages.

## Abstract :

The current understanding of the Moon, its origin and evolution, is particularly thankful to the Apollo program, which was born as a result of the US national endeavor in the sixties space rush. But Apollo was not only strategic; the scientific ambition was actually very high. A step after N. Armstrong and E. Aldrin's first one on the Moon, the science experiments performed were a great success which revolutionized the pre-Apollo view of our satellite. Both surface and interior science were addressed, but both are now to be considered as schematic views, with numerous gaps.

Thirty years after, only two american remote-sensing missions in the nineties completed the view of the early eighties. But those were not enough to answer all the remaining questions, even if the knowledge we have of the Moon now is far different from that of 1968.

In the years to come, new missions from India, Japan, China, US will explore the lunar surface from orbit, in order to get more precise selenographic, topographic and mineralogical maps, as well as to determine an accurate lunar gravity field, which is relevant to the lunar interior. Nevertheless, the internal structure will remain very blurred and no constraint about the center of the Moon nor concerning the possible difference between the near and far hemisphere's interior will be informed by these missions. Therefor, it is compulsory to land once again on the Moon to install long term observatories containing geophysical packages similar to what was deployed by Apollo on a small scale. Among the possible instruments, the lunar science community is unanimously requesting new experiments of seismology and heat flow, including drilling.

## **Introduction :**

<Introduction de la présentation. Le choix de la langue laissé au rédacteur>

1969, l'humanité fait son premier pas sur la Lune. La Terre contemple l'exploit technologique sur ses petits écrans palpitants. Après cette prouesse ultra-médiatisée, la science va vite prendre le pas sur la course stratégique à l'espace, et retrouver un quasi-anonymat qui lui est plus habituel. À leur terme en 1977, les missions Apollo auront permis à 6 équipages de procéder à de nombreuses expériences scientifiques depuis la Terre, l'orbite lunaire, et la surface même de notre satellite. Certaines n'ayant duré que pendant le court séjour des astronautes sur la Lune, d'autres fonctionnant encore à ce jour. Les premières analyses d'échantillons rapportés par Apollo 11 ont bouleversé instantanément la vision que l'on avait alors de la nature de la Lune et de sa probable origine. Puis chacune des missions suivantes, à partir des échantillons de roches lunaires ou des différentes expériences géophysiques, a peu à peu permis de lever le voile pour finalement arriver une décennie plus tard, au début des années 80, à dresser un ébauche cohérente de notre satellite [1].

## **Partie 1 : la science lunaire lacunaire**

La structure interne de la Lune et son origine sont en effet intimement liés. Grâce aux missions Apollo et notamment à l'expérience de sismologie, nous disposons aujourd'hui d'une description schématique de la nature de l'intérieur de notre satellite [e.g. 2,3,4,5], et de sa probable genèse cataclysmique lors d'un mega-impact entre la proto-terre et une proto-planète de la taille de Mars [6]. Néanmoins, cette vue n'est que partielle. En plus d'être très "floue", elle n'est de surcroît qu'hémisphérique. En effet, aucune des missions Apollo n'a aluni sur la face cachée, et celle-ci n'a pas été échantillonnée, que ce soit par des prélèvements de roche ou par des signaux sismologiques. De la même manière, aucun des enregistrements sismiques disponibles n'a sondé les grandes profondeurs de la Lune et la présence éventuelle d'un noyau partiellement fluide n'est encore qu'une hypothèse, même si de nouvelles données indirectes (notamment par télémétrie laser [7,8]) permettent d'argumenter en ce sens.

## **Partie 2 : la surface sur le point d'être explorée ... de loin**

Du côté des données de surface, les échantillons analysés suite aux missions Apollo et Luna (URSS), ont révolutionné les idées que l'on avait de la nature géochimique de la croûte lunaire. Toutefois, suite aux missions Clementine et Lunar Prospector, les sites d'échantillonnages se sont avérés correspondre à des points particuliers, se situant souvent aux limites de plusieurs unités géologiques distinctes. Ils ne représentent dès lors que des régions spécifiques, voire anormales, et ne permettent pas une vision d'ensemble. Ceci est essentiellement dû à la nature particulièrement "mélangée" et hétérogène de la surface lunaire, résultant d'intenses phases d'impacts météoritiques. Clementine et Lunar Prospector ont considérablement amélioré la couverture et la résolution des cartes de composition géochimique depuis les relevés Apollo, puisque les sub-satellites Apollo n'avaient qu'une couverture équatoriale. Les abondances des principaux éléments présents à la surface lunaire sont à présent bien contraintes, sur la quasi-totalité du satellite. Néanmoins les mesures de télédétection ne sont sensibles qu'aux premier(s) centimètre(s) de régolithe, et la structure même de celui-ci (nature, épaisseur) reste incertaine. Si les échantillons récoltés in situ permettent de recouper et de contraindre certaines observations effectuées depuis orbite, il existe cependant de nombreuses lacunes spatiales. Des zones et unités géologiques n'ont en effet jamais été échantillonnées, et comportent de multiples inconnues, notamment sur la face cachée et dans la région du bassin South Pole Aitken, le plus grand cratère d'impact du Système Solaire connu à ce jour. Ainsi, il apparaît nécessaire de retourner à la surface de la Lune afin d'y voir de plus près, et surtout de plus profond (carottage), pour s'affranchir du vaste mélange géochimique produit par plus de 4 milliards d'années d'impacts météoritiques. En plus du South Pole Aitken Basin, où pourrait affleurer des composants mantelliques, les zones polaires totalement inconnues, constituent

des cibles d'exploration très prisées puisque bénéficiant de conditions extrêmes d'illumination, elles pourraient abriter des quantités non négligeables d'eau à l'état de glace.

Les missions actuellement en vol, en développement et sur le point d'être lancées par les agences spatiales européenne (SMART-1), Japonaise (SELENE), Indienne (Chandrayaan-1), Chinoise (Chang-E) et américaine (Lunar Reconnaissance Orbiter, Moonrise) montre un réel regain d'intérêt pour la science lunaire et ses enjeux. Toutes ces missions auront pour but d'accomplir une cartographie détaillée de la Lune et de sa composition chimique de surface. À l'issue de la prochaine phase d'exploration lunaire, le retard accumulé par rapport aux récentes avancées faites sur Mars, devrait être largement comblé. Néanmoins, la plupart des instruments dédiés à ces missions sont focalisés sur la surface, ou la sub-surface (<1km), mais ne permettront aucunement de dévoiler les secrets des profondeurs. Pour cela il n'existe qu'une solution : alunir et poser des instruments géophysiques.

### **Partie 3 : la structure interne de la Lune, une ébauche à compléter**

En effet, on constate qu'aucune étude visant à modéliser la structure interne de la Lune [cf. 9] n'arrive à dresser une description du manteau lunaire suffisamment précise pour qu'elle soit interprétable sans ambiguïté en terme de minéralogie ou de profil de température. Les différents modèles ne sont que rarement concordants, de même, la croûte lunaire peine à faire l'unanimité en ce qui concerne son épaisseur et sa structure puisque les travaux les plus récents [4,5] proposent des estimations jusqu'à deux fois inférieures à celles de l'ère Apollo [10] (30 km au lieu de 60 km). Pour ce qui est de l'intérieur profond, la situation est encore plus incertaine puisque aucune des données sismologiques Apollo n'échantillonne les zones centrales et que seules des données indirectes contraignent aujourd'hui les hypothèses de l'existence d'un petit noyau métallique partiellement fondu.

L'essentiel des questions portant sur la structure interne de la Lune pourrait être résolu à l'aide d'un nouveau réseau de stations géophysiques disposées à la surface, comportant notamment des capteurs sismologiques. Les missions Apollo avaient déjà installé dès 1969 un réseau de 4 stations sismologiques, qui ont fonctionné jusqu'en 1977 sur la face visible. Cette expérience avait radicalement changé la perception qu'on avait de l'intérieur de notre satellite, en décrivant notamment une planète peu active sans être toutefois "morte", la présence de séismes naturels déclenchés par les forces de marée, la différenciation en une croûte et un manteau, témoin d'une évolution complexe suivant une genèse tumultueuse. Aussi réussie qu'elle soit, cette expérience en répondant à certaines questions en a levé de nouvelles, jusqu'ici sans réponse. La première lacune du réseau Apollo est de ne couvrir qu'un triangle de 1000 km de côtés, centré sur la face visible de la Lune. L'étape suivante sera ainsi de disposer de dix stations réparties sur toute la surface de la Lune, hémisphère caché et pôles compris, équipées des instruments les plus récents développés pour les conditions lunaires. De cette manière, des signaux sismiques de plus faible intensité pourront être enregistrés, et grâce au plus grand nombre de stations, il sera possible de les localiser. Ainsi, l'identification ou l'absence de signal sismique enregistré depuis la face cachée confirmera ou non l'hypothèse d'une profonde asymétrie dans la structure et l'activité interne de la Lune. Les stations de la face cachée permettront également de contraindre la taille et la nature de l'hypothétique noyau lunaire. Enfin, à chacune des stations l'épaisseur de la croûte pourra être déterminée, ce qui renseignera sur les variations latérales d'activité interne en plus de l'histoire météoritique, et pourra apporter de nouvelles contraintes sur la structure du manteau superficiel grâce au couplage avec les données de gravimétrie (satellites). Afin de palier la faible activité sismique lunaire (autant interne qu'externe [météorites]), il est nécessaire de faire fonctionner le réseau sismologique pendant suffisamment longtemps. Les événements les plus énergiques (les plus utiles aux sismologues) étant les plus rares, deux ou trois années en continu minimum seront indispensables.

En plus des sismomètres, d'autres instruments géophysiques sont recommandés. Tout d'abord des sondes thermiques, permettant de caractériser le flux de chaleur de la planète en divers endroits, illustrant le régime thermique et l'activité de la Lune à l'heure actuelle, fortement contraints par les conditions dans lesquelles elle a trouvé naissance. Couplés à ces mesures thermiques, des carottages dans la croûte superficielle pourraient s'avérer cruciaux pour décrire le régolithe et ses variations latérales.

### **Conclusion**

Les missions Apollo ont permis de comprendre les grandes lignes de la formation et de l'évolution de la Lune. Aujourd'hui, une page se tourne et nous allons vivre dans la décennie qui vient un retour sur la Lune. Dans un premier temps, celui-ci sera orbital et permettra de décrire avec précision la surface lunaire. Ces missions sont déjà en développement, voire en vol actuellement. La seconde étape devra se focaliser sur la structure interne, encore très mal connue, et pour cela il est indispensable de retourner à la surface et d'y déposer de nouveaux instruments. Ces expériences, sismologie, flux de chaleur, carottage, devront être conduites extensivement, et réparties au maximum de la surface lunaire. Un enjeu évident étant de couvrir la face cachée, jamais sondée/échantillonnée jusqu'alors. Après ce nouvel élan robotique, l'exploration lunaire se poursuivra inévitablement par un retour de l'Homme sur la Lune, évoqué de plus en plus concrètement par les différentes agences spatiales.

### **Références**

- [1] Heiken, G. et al., Lunar Sourcebook : A User's Guide to the Moon, 1991.
- [2] Nakamura, Y., Seismic Velocity Structure of the Lunar Mantle, J. Geophys. Res., 1983.
- [3] Khan, A. and K. Mosegaard, An inquiry into the lunar interior: A nonlinear inversion of the Apollo lunar seismic data, J. Geophys. Res., 2002.
- [4] Lognonné, P. et al., A new seismic model of the Moon: implications for structure, thermal evolution and formation of the Moon, Earth Planet. Sci. Lett., 2003.
- [5] Chenet, H. et al., Lateral variations of lunar crustal thickness from the Apollo seismic dataset, *submitted to* Earth Planet. Sci. Lett., 2005.
- [6] Canup, R., Simulations of a late lunar-forming impact, Icarus, 2004.
- [7] Williams, J. G. et al, Lunar rotational dissipation in solid body and molten core, J. Geophys. Res., 2001.
- [8] Khan et al., Does the Moon possess a molten core? Probing the deep lunar interior using results from LLR and Lunar Prospector, J. Geophys. Res., 2004.
- [9] Chenet, H., La structure interne de la Lune, Thèse de doctorat, Université Paris 7 - Denis Diderot, 2003.
- [10] Toksöz, N. et al., Structure of the Moon, Rev. Geophys. Space Phys., 1974.