

La télémétrie laser-Lune ou quand les photons font l'aller-retour de la Terre à la Lune

La télémétrie laser permet de déterminer avec précision de grandes distances qui échappent à la mesure directe. La cible la plus éloignée jamais atteinte par cette méthode est notre satellite naturel, la Lune... Principe simple, mais mise en œuvre des plus délicates caractérisent cette technique utilisée avec succès depuis l'arrière-pays de la Côte d'Azur par une équipe rassemblant techniciens et chercheurs autour d'une instrumentation de pointe qui suit de près les progrès de la technologie, voire les suscite. Passée en 10 ans d'une trentaine de centimètres à moins de trois, la précision des mesures devrait atteindre quelques millimètres d'ici 1995, pour une meilleure connaissance de la dynamique du système Terre-Lune conduisant à des applications très variées, depuis la rotation de la Terre et les systèmes de référence jusqu'à l'intérieur de la Lune, en passant par des tests de théories de la gravitation.

Des corps de l'univers autres que notre Terre, la Lune est le plus proche. C'est aussi celui dont la distance a été connue le plus tôt. Les Grecs en avaient déterminé la taille et l'éloignement en fonction de la taille de la Terre, utilisant pour cela quelques considérations ingénieuses liées aux observations d'éclipses de Soleil et de Lune. Ainsi, pour les astronomes du début de notre ère, non seulement la Terre est ronde, mais la Lune aussi, environ quatre fois plus petite que notre planète et bien éloignée d'elle puisqu'à quatre-vingts rayons terrestres. La Lune fournit ainsi la première échelle de distance de l'univers proche qui apparaît déjà bien grand!...

Il faut ensuite attendre le dix-huitième siècle pour que la mesure de la distance de notre satellite naturel soit déterminée avec cette fois une précision de quelques kilomètres. On observe simultanément la hauteur de la Lune au-dessus de l'horizon depuis deux points éloignés de la Terre, si possible sur un même méridien, et de ces deux angles et de la longueur de la base, on déduit la distance par triangulation. Lalande et

La Caille réalisèrent une telle mesure entre Berlin et Le Cap en 1751. La technique s'est ensuite raffinée au gré de l'amélioration des instruments et des techniques de réduction. Jointes à des mesures angulaires, ces distances ont permis de disposer d'un matériel observationnel permettant aux théoriciens, mécaniciens-célestes en l'occurrence, de mettre leurs modèles à l'épreuve des faits.

La télémétrie, ou quand on mesure un temps et non une distance...

Le principe de la télémétrie laser est simple: on envoie une impulsion de lumière à travers un télescope (qui joue le rôle d'un canon au pointage très précis) vers un réflecteur posé sur la Lune. Une partie de la lumière émise nous est renvoyée et va, après deux secondes et demie environ de voyage, être reçue par le même télescope. Il suffit de dater l'instant de départ de l'impulsion et celui du retour des échos pour connaître le temps de trajet. On conçoit qu'en multipliant cette mesure par la vitesse de la lumière, on obtienne la longueur du trajet parcouru, et en divisant par deux (puisque la lumière a fait un aller-retour), la distance de notre télescope à la Lune, ou plus précisément au réflecteur visé...

En y regardant de plus près, le passage du temps à la distance

n'est pas aussi simple, l'atmosphère ralentissant par exemple les photons et allongeant ainsi leur temps de trajet (voir encadré 1). Retenons pour l'instant que l'on mesure un intervalle de temps que l'on peut assimiler à une distance. Quels sont les ordres de grandeur de la conversion temps/longueur? En une nanoseconde (ns), soit un milliardième de seconde, la lumière parcourt une trentaine de centimètres. Vouloir mesurer la distance de la Lune à quelques centimètres signifie donc maîtriser la mesure du temps à quelques dixièmes de milliardièmes de seconde!

La télémétrie de la Lune commence après la Seconde Guerre mondiale avec l'utilisation du radar dans un principe identique à celui qui vient d'être exposé, l'impulsion lumineuse étant remplacée par un train d'ondes radar, et le télescope par une antenne radio. Pas besoin de réflecteurs sur la Lune: le sol même renvoie une partie des ondes émises. Ce dernier point est en fait un handicap car, faute de connaître le point d'impact, l'utilisation de la mesure est limitée, puisque le relief de la Lune est loin d'être négligeable, et qu'il faudrait pour en tenir compte connaître parfaitement le point d'impact.

Obtenir une mesure exploitable passe donc par la définition non ambiguë de ce point. C'est pourquoi la télémétrie laser est indissociable du développement des vols spatiaux vers la Lune.

Où l'on pose des cataphotes sur la Lune...

C'est Apollo 11 qui transporte, en Juillet 1969, les premiers hommes qui vont mettre un pied sur la Lune. Plus important encore (pour ce qui nous occupe ici), il emporte le premier panneau de cataphotes que les astronautes vont déployer sur leur site d'alunissage dans la Mer de la Tranquillité. Deux autres missions, Apollo 14 (près du cratère Fra Mauro), et Apollo 15 (près des contreforts des Apennins) viendront compléter le réseau de réflecteurs *made in USA*. Les Français, associés aux Soviétiques, vont eux aussi contribuer à la pose de cibles sur la Lune. Deux cataphotes *made in France* seront ainsi déposés en 1971 et 1973 par les véhicules automatiques Lunakhod 1 et 2. Celui de Lunakhod 1 semble avoir connu quelques problèmes, et l'on n'a jamais réussi à en recevoir des échos de manière routinière. Fin 1973, et encore aujourd'hui, quatre réflecteurs sont donc disponibles sur la Lune.

Au fait, à quoi ressemblent ces cataphotes? Ce sont des coins de cube qui ont la propriété essentielle de renvoyer la lumière dans la direction d'où elle est arrivée grâce aux réflexions successives sur trois plans perpendiculaires

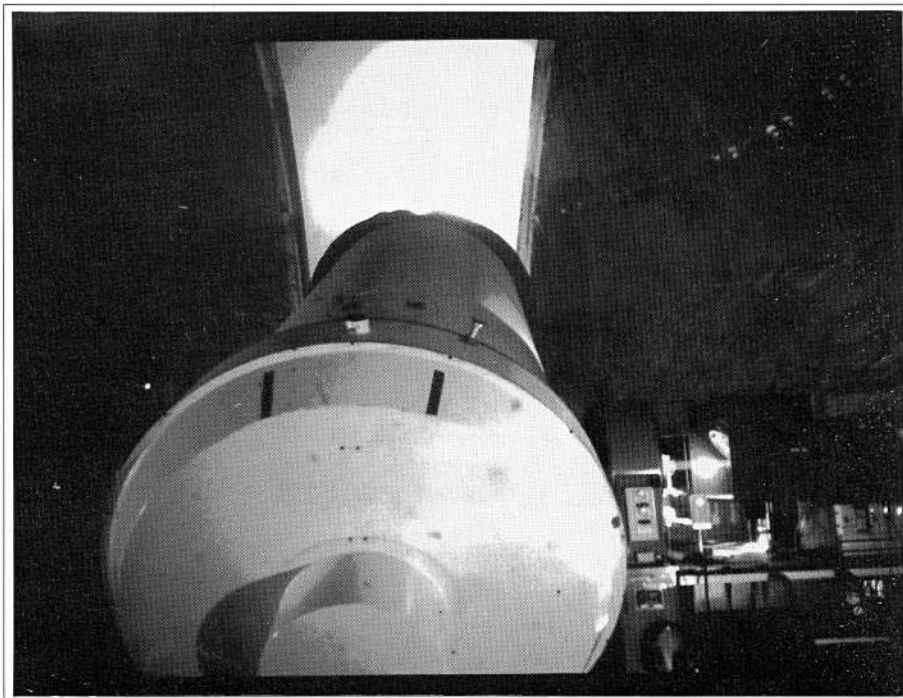


Figure 1 - Le télescope tire sur la Lune... Si la divergence du faisceau est de l'ordre de la seconde d'arc quand les optiques sont alignées au mieux, l'atmosphère se charge de détériorer les choses. Son agitation peut donner suivant les nuits une tache de cinq, voire dix secondes d'arc sur la Lune, soit une vingtaine de kilomètres. L'efficacité du tir s'en trouve diminuée, puisque la densité d'énergie au sol lunaire, donc ce que reçoit le panneau de cataphotes, est ainsi amoindrie.

deux à deux. On est ainsi assuré de recevoir des échos de ce qu'on a envoyé, quelles que soient les positions respectives du télescope qui suit le mouvement de la Terre en rotation sur elle-même et autour du Soleil, et du réflecteur qui lui aussi se déplace au gré du mouvement de la Lune sur son axe ou autour de la Terre.

Où l'on fait la chasse aux photons sur la Terre...

La mission d'Apollo 11 fut accompagnée de nombreux efforts dans différents pays (principalement aux Etats-Unis), pour équiper des télescopes du matériel nécessaire à la télémétrie laser. Très vite, des échos ont été détectés depuis plusieurs sites, mais très vite aussi, une seule station, celle de l'observatoire de McDonald (Texas), a pu être vraiment opérationnelle, et c'est elle qui a fourni pendant une quinzaine d'années l'essentiel des mesures de télémétrie. Serait-il donc si difficile de faire de la télémétrie laser-Lune?

La réponse est oui! Il faut concevoir que l'on envoie une quantité de lumière considérable en peu de temps (c'est l'intérêt du laser), disons 10^{18} photons (un milliard de milliards!). Quand tout se passe

bien, on arrive à détecter un photon en écho seulement tous les cent à mille tirs! Sachant que les lasers actuels permettent une cadence de dix tirs par seconde, il faut attendre une dizaine de minutes pour voir revenir une trentaine de photons, en ouvrant plus de six mille fois notre œil électronique (un photomultiplicateur ou une photodiode) qui détecte ces infimes quantités de lumière.

Et des photons, il en vient en permanence du ciel si l'on travaille de jour, de la Lune si le réflecteur que l'on vise est dans le croissant éclairé, et aussi du détecteur qui souvent croit voir des photons où

Encadré 1

Vous avez dit distance ?...

Le temps de trajet aller-retour n'est pas réellement assimilable à une distance, et ce pour plusieurs raisons :

- entre le moment du départ de l'impulsion du télescope et son arrivée sur la Lune, il s'est écoulé 1,25 seconde environ. Le réflecteur n'est pas à la même place qu'au départ du tir. De même, il s'est écoulé deux secondes et demie environ, entre le départ et le retour de l'impulsion, et pendant ce temps, la station s'est déplacée puisque, entre autres, la Terre tourne.

- la lumière, dans l'atmosphère, va moins vite que dans le vide. Ce ralentissement se traduit par un allongement du temps de trajet correspondant à plusieurs mètres sur la distance, allongement qui est d'autant plus long que la Lune est basse sur l'horizon, donc que l'impulsion laser traverse une couche d'atmosphère plus épaisse. On corrige cet effet en modélisant l'atmosphère le long du trajet à partir des paramètres météorologiques à la station (température, pression, humidité). L'incertitude de la correction ainsi effectuée est de quelques millimètres pour une hauteur de quarante degrés (ou plus) au-dessus de l'horizon, mais peut atteindre deux centimètres si la Lune est à quinze degrés de hauteur!

- la lumière ne se déplace pas en « ligne droite » de la Terre à la Lune. Son trajet est courbé par le champ de gravitation du Soleil (et à une échelle moindre par ceux de la Terre et de la Lune). La distance à parcourir se trouve ainsi allongée de plus de dix mètres!

Encadré 2

La station laser-Lune de l'OCA/CERGA en quelques chiffres...

le télescope

monture azimutale
miroir primaire de 1,5 m de diamètre
focale: 30 m
divergence du faisceau en sortie: 1 seconde d'arc
précision du pointage: 3 secondes d'arc (*rms*) en absolu
précision de poursuite: 1 seconde d'arc en aveugle pendant 10 mn

le laser avant Sept. 86

Type: rubis
Energie: 3 J à 0,694 μm
Durée de l'impulsion: 3 ns
Cadence de tirs: 1 toutes les 6 secondes

le laser depuis Sept. 86

Type: Néodyme-YAG
Energie: 600 mJ à 1,06 μm
Energie: 300 mJ à 0,53 μm
Durée de l'impulsion: 400 ps
Cadence de tirs: 10 Hz

des hommes et des femmes dans l'équipe laser-Lune

deux ingénieurs
trois assistants ingénieurs
un technicien
deux astronomes
plusieurs chercheurs associés à l'équipe

beaucoup de temps d'observation

On observe, dès que la Lune est dans le ciel (au moins à 20° au dessus de l'horizon), sans être trop près du Soleil, ou trop brillante. Sont donc exclues quelques nuits (six en principe) centrées autour de la Nouvelle Lune, et quatre nuits autour de la Pleine Lune.

Il reste par lunaison, au gré des saisons, entre 15 et 20 sessions d'observation dont une partie peut être de jour. Les séries de tirs (dix par seconde pendant douze minutes) se succèdent à raison de quatre par heure. Apollo 15 est la cible privilégiée, en raison de son efficacité, du relief environnant qui permet de vérifier le pointé quand elle est éclairée, et du fait qu'elle peut être observée même violemment éclairée par le Soleil. Dès que des échos ont été reçus d'Apollo 15, les autres réflecteurs sont visés tour à tour en fonction de leur éclairage et des conditions météorologiques.

des moyens financiers

En France, en plus du soutien de base de l'OCA et du CERGA, c'est principalement l'astronomie à l'INSU qui finance la maintenance et le développement de la station du CERGA, avec un soutien non négligeable du CNES, et le passage obligé par des contrats extérieurs...

Précision de mesure et impulsion laser...

Il est impossible de savoir si le photon que l'on détecte de temps à autre vient du début ou de la fin de l'impulsion laser envoyée. C'est là l'incertitude fondamentale de la télémétrie laser quand le niveau de retour est ce que l'on appelle le simple photo-électron. Plus l'impulsion émise est courte, plus cette incertitude est faible, mais moins on émet de photons ! Impossible en effet de mettre beaucoup d'énergie dans un temps trop faible. Les lasers couramment utilisés (Néodyme-YAG) peuvent délivrer de l'ordre de un joule en quelques centaines de picosecondes, la puissance correspondante étant de l'ordre de quelques Gigawatts. La durée de l'impulsion correspond à une incertitude tir à tir de cinq à dix cm sur la mesure de distance, incertitude ramenée à un ou deux centimètres en accumulant les échos sur une dizaine de minutes. La durée de l'impulsion n'est malheureusement pas la seule source d'incertitude. L'électronique de datation, le temps de transit dans les détecteurs viennent chacun ajouter leur pierre à l'édifice des erreurs instrumentales. L'atmosphère apporte enfin la dernière touche.

C'est ainsi que les mesures de distance de la Lune faites à l'OCA ont une incertitude de deux à trois centimètres.

il n'y en a pas ! Il nous faut donc reconnaître les bons, les échos qui sont notre *signal*, des mauvais, le *bruit*. Pour cela, nous commençons par ne regarder qu'une petite zone autour du réflecteur visé, quelques secondes d'arc (une dizaine de kilomètres sur la Lune). Ensuite, nous ne considérons que les photons de la bonne couleur. Le laser étant bien stabilisé en température, sa longueur d'onde est bien définie. Un filtre très étroit peut être utilisé, moins de 0,2 nm. Voilà qui est bien : on reçoit les bons photons venant du bon endroit. Et pourtant, pour peu que les conditions ne soient guère favorables, on détecte plus d'un million de tels photons chaque seconde !

Notre signal est donc encore noyé dans le bruit. Heureusement, il nous reste un dernier filtrage, temporel celui-ci. Sachant quand est partie l'impulsion laser, le calculateur qui gère l'expérience en temps réel va prédire le moment où les échos vont revenir, profitant de la connaissance relativement bonne du mouvement de la Lune que l'on possède. Et plutôt que de regarder en permanence, notre œil électronique ne va s'ouvrir qu'à ce moment prédit, en fait un peu avant, pour se fermer un peu après. Cet intervalle de temps est de nos jours très petit, cent milliardièmes de seconde, et la plus grande partie du bruit se trouvera éliminée... Un traitement statistique des photons reçus permettra enfin d'être sûr de la présence des échos, et la compression de l'information sur une série de tirs d'une dizaine de minutes, donnera un temps de trajet aller-retour du télescope au réflecteur visé à un instant donné, ce que l'on appelle un point normal.

Plus de vingt-deux ans après la mission Apollo 11, nous nous trouvons dans une situation paradoxale : il y a plus de cibles sur la Lune qu'il n'y a de stations sur Terre capables de les utiliser en routine ! En effet, début 1992, il n'y a que deux stations opérationnelles de par le monde : celle de McDonald, qui a changé de configuration au début des années 1980 en passant d'un gros télescope de 2,7 m à un petit de 0,75 m de diamètre seulement, et celle du CERGA (Centre d'études et de recherches géodynamiques et astronomiques). On trouvera en encadré quelques caractéristiques de notre station, et à la figure 2 une comparaison de la productivité du réseau laser-Lune depuis mi-1987.

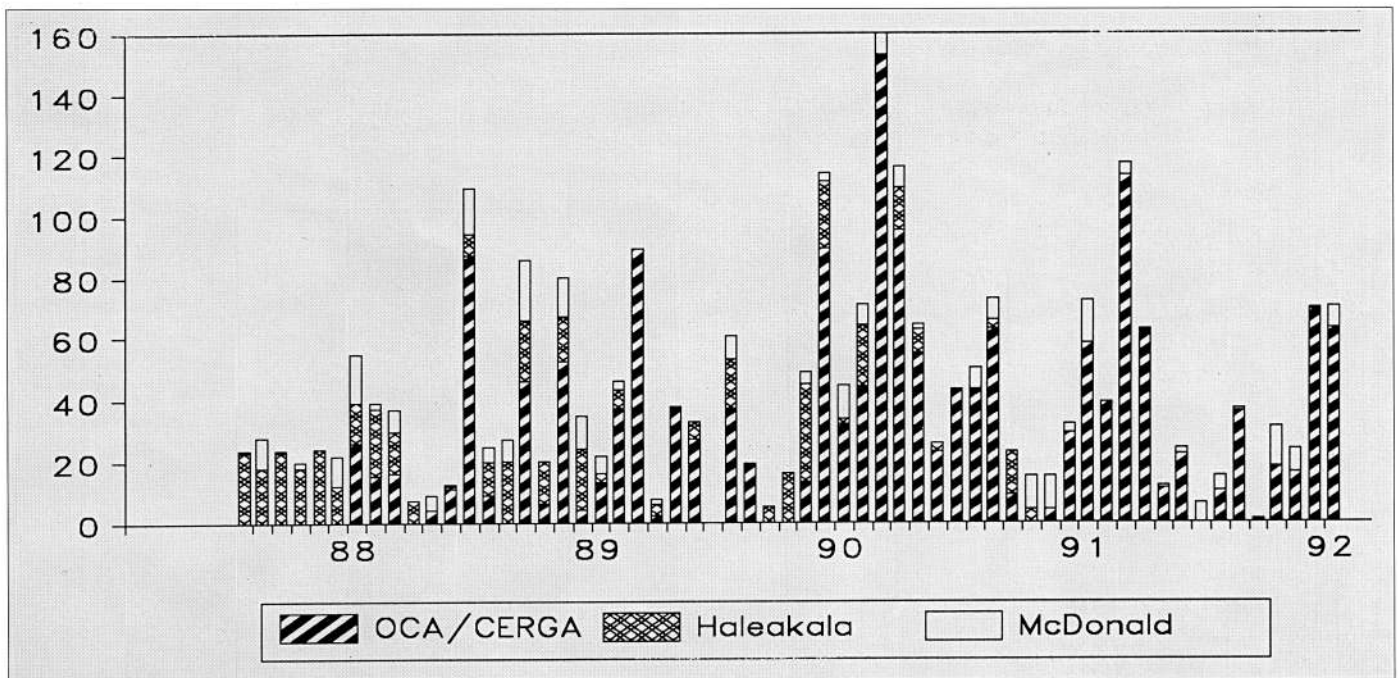
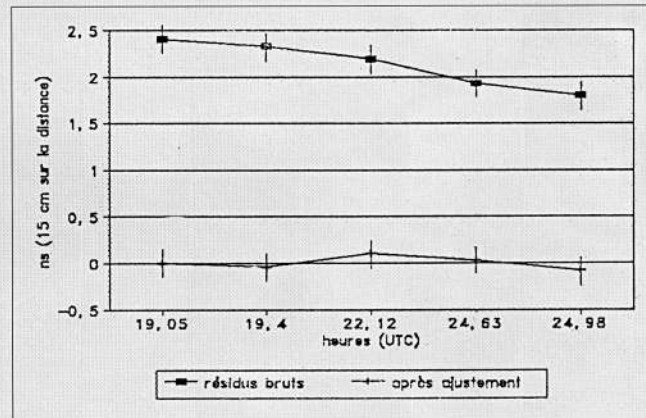


Figure 2 - Nombre de points normaux obtenus depuis juin 1987 par les trois stations en opération au Texas (McDonald), à Hawaii (Haleakala) et en France (OCA/CERGA). L'irrégularité du volume de données de lunaison en lunaison vient principalement du temps qu'il fait! L'été sur la Côte-d'Azur n'est guère favorable aux observations (temps ensoleillé, mais ciel brumeux). La station d'Hawaii a dû cesser les observations de la Lune début 1991 à cause de problèmes budgétaires à la division des Sciences de la Terre de la NASA, les applications majeures du laser-Lune regardant plus la Lune et la physique fondamentale...

Encadré 3

Laser-Lune et rotation de la Terre

Dans la dynamique du système Terre-Lune, la plus petite période rencontrée est celle de la rotation de la Terre, soit environ 24 heures. Si l'on trace les écarts entre le trajet aller-retour observé et celui que donne le calcul (les résidus) obtenus sur une session d'observation, soit quelques heures, ils vont exhiber une dérive et un biais. Le biais vient d'une mauvaise détermination de la position du réflecteur relative à la Terre. La dérive vient d'une erreur sur la prédiction des paramètres de la rotation de la Terre. La position de l'axe de cette rotation peut être prédite avec une bonne précision en utilisant des mesures faites quelques semaines plus tôt. Il n'en est pas de même de l'angle de rotation autour de cet axe ($UT1-UTC$), qui subit de nombreuses fluctuations rapides (de quelques heures à quelques jours) gouvernées principalement par des phénomènes atmosphériques, Terre solide et atmosphère s'échangeant conti-



nuellement de l'énergie. A partir de l'amplitude de la dérive observée en quelques heures de tirs sur la Lune, il est possible de déterminer en temps quasi-réel l'écart entre la position prédite et la position réelle de la Terre en rotation autour de son axe. Le graphique ci-dessus montre les résidus bruts et ceux calculés après ajustement d'un biais et dé-

termination de $UT1-UTC$ à partir de la position du pôle prédite. Cinq points normaux sur Apollo 15 dans la nuit du 16 au 17 janvier 1992 ont permis de calculer une valeur de $UT1-UTC$ dont l'incertitude est de 0,11 ms de temps. L'écart-type des résidus après ajustement est de moins de 9 mm sur la distance...

Si bien des applications scientifiques peuvent se contenter d'une seule station, il n'en est pas moins vrai qu'il est toujours préférable d'avoir plusieurs sources de mesures, ne serait-ce que pour accroître

le volume de données (sur plusieurs stations dispersées autour du globe, il est rare qu'aucune n'ait un ciel dégagé). Mais c'est surtout quand il s'agit de vérifier son exactitude qu'il est très in-

confortable d'être seul ou trop largement dominant. A quoi bon en effet avoir une précision de deux centimètres si toutes les observations ont un biais de quelques dizaines de centimètres?

Heureusement, l'importance de la télémétrie laser-Lune permet d'espérer que d'autres stations viendront se joindre à celles qui tournent aujourd'hui. Déjà en Allemagne, quelques échos ont été observés avec un équipement tout neuf qui ne pourra consacrer (dommage!) que quelques nuits par an à la Lune. En Australie, une autre station pourrait bientôt renouer avec les observations de la Lune, et les Chinois sont en train de développer une station complètement dédiée au Laser-Lune. Une autre devrait se construire au Sud de l'Italie, à la fois pour la télémétrie des satellites artificiels et de notre satellite naturel.

Tous ces efforts sont déployés car les applications scientifiques de la télémétrie laser-Lune sont nombreuses. Curieusement, elles n'ont guère changé depuis les années soixante. En fait, ce qui a le plus changé est la qualité des observations qui permet d'envisager des incertitudes sur la détermination des paramètres du système Terre-Lune jamais atteintes jusqu'à présent.

Pour quelles applications ?

Pour pouvoir rendre compte par le calcul du temps de trajet d'une impulsion lumineuse du télescope au panneau de réflecteurs, il faut modéliser les différents mouvements qui prennent place dans le système Terre-Lune.

Commençons par le réflecteur, posé depuis une vingtaine d'années sur le sol lunaire (des différents équipements emportés sur la Lune lors de son exploration, les quatre réflecteurs sont les seuls encore utilisés). Le mouvement le plus important est celui que fait la Lune autour de la Terre. L'avènement des observations laser-Lune a fait faire un bond de deux ou trois ordres de grandeur dans la détermination des paramètres orbitaux de la Lune.

Il en est de même pour la rotation de la Lune, qui fait un tour sur elle-même en même temps qu'elle fait un tour autour de la Terre (c'est pour cela qu'elle nous montre toujours la même face). En fait, la Lune se balance autour de cette rotation moyenne. Ces libérations sont d'origines diverses: influence des autres planètes, du Soleil, et aussi interaction entre les figures de la Terre et de son satellite, qui ne sont ni sphéri-

Encadré 4

Laser-Lune et relativité

En dehors de l'amélioration considérable de notre connaissance des mouvements de la Lune directement offerte par les observations laser-Lune, la plus importante application en physique fondamentale, qui a motivé l'embarquement de rétroreflecteurs à bord de sondes spatiales où chaque kilogramme est compté, a trait à la gravitation. Vérifier la constance de G (la constante de la gravitation) était l'un des buts clairement annoncés des pionniers des années 1960. Malheureusement, une dérive de G se traduirait par un ralentissement de la vitesse angulaire de la Lune sur son orbite, une accélération séculaire (négative!). Or, en raison des interactions de marée entre la Terre et la Lune, il y a accélération séculaire de la Lune (le laser-Lune donne $-24''/\text{siècle}^2$) qui doit être modélisée suffisamment correctement pour mettre en évidence la contribution d'une éventuelle variation de G . La limite actuelle est $\frac{\dot{G}}{G} < 2 \times 10^{11}/\text{an}$.

Une autre application de type relativiste a été suggérée par Nordtvedt en 1968: si la Terre et la Lune ne répondent pas de la même façon au champ de gravitation du Soleil, violant ainsi le principe d'équivalence de la relativité générale, l'orbite de la Lune autour de la Terre se trouve allongée le long de l'axe Terre-Soleil. Cet effet est calculable, et ne se super-

pose pas à d'autres effets à modéliser. En 1976, deux équipes américaines, à partir des observations faites à McDonald, ont montré qu'aucun effet Nordtvedt n'était mesurable, conduisant à une vérification du principe d'équivalence de quelques unités par 10^{12} . Les rapports M_G/M_I , (Masse gravitationnelle)/(Masse inertielle), de la Terre et de la Lune diffèrent donc de moins de 10^{-11} . Le laser-Lune est à l'heure actuelle le meilleur test de ce principe d'équivalence pour des corps massifs, c'est-à-dire tirant leur cohésion de leur gravitation propre. Mieux encore, deux décades de télémétrie laser au centimètre, (moins longtemps si l'on descend à cinq millimètres), permettraient de comparer les M_G/M_I de la Terre et la Lune à 5×10^{-13} , ce qui constituerait la meilleure expérience d'Eötvös jamais réalisée.

Si l'on passe en formulation paramétrique:

$$M_G/M_I = 1 + (4\beta - 3 - \gamma) U_G/(Mc^2)$$

et le test précédent permet la contrainte suivante:

$$|4\beta - 3 - \gamma| \leq 1,2 \times 10^{-3}$$

ce qui, compte tenu de la précision obtenue pour γ avec d'autres techniques, conduit à:

$$|1 - \beta| \leq 3 \times 10^{-4}$$

La meilleure contrainte sur la structure non linéaire de la théorie de la gravitation vient donc de la télémétrie laser-Lune...

ques, ni homogènes, ni rigides... On comprendra que la modélisation n'est guère facile, mais que sa confrontation avec les observations permettra de donner des contraintes par exemple sur l'intérieur de la Lune, car tout corps tourne sur lui-même en fonction de sa structure interne (voir un œuf cru et un œuf dur pour s'en convaincre!). Le laser-Lune est l'une des rares techniques qui permette à l'heure actuelle des développements dans le domaine de la sélénophysique.

Ceux qui s'intéressent à l'évolution de l'orbite lunaire, soit pour remonter dans le passé, soit pour voir ce qu'elle va devenir, ont eux aussi besoin du laser-Lune qui seul fournit une mesure précise de l'accélération séculaire de la Lune en même temps qu'un instantané précis des mouvements actuels.

Si nous regardons maintenant du côté de la station, nous voyons qu'elle se trouve sur la Terre qui tourne sur elle-même en vingt-quatre heures. Cette rotation est loin d'être régulière quand on y regarde de près. Elle subit de nombreuses fluctuations, tant en ce qui concerne la direction de son axe que sa vitesse. De même que pour le mouvement de la Lune, il faut modéliser cette rotation à laquelle les mesures sont très sensibles. D'autres techniques contribuent à l'étude de la rotation de la Terre (interférométrie à très grande base, télémétrie laser sur satellites...), mais le laser-Lune a une application pratique immédiate importante pour la prédiction rapide (fondée sur des observations récentes) de la rotation de la Terre (voir encadré 3).

Terre et Lune étant tous deux en orbite autour du Soleil, les me-

sures laser-Lune contribuent de manière très significative à l'élaboration des éphémérides du Système Solaire. C'est le laser-Lune qui établit l'orientation entre l'écliptique (le plan contenant l'orbite moyenne de la Terre) et l'équateur de la Terre, élément clé de la navigation dans l'espace. Le laser-Lune permet aussi d'orienter de manière consistante les longitudes des planètes intérieures et de la Lune, et enfin de déterminer le rapport des masses de la Terre et de la Lune.

Un dernier champ d'application a trait aux différents tests liés aux théories de la gravitation que peut faire la télémétrie laser-Lune. Terre et Lune ont des masses très importantes et des vitesses que l'on ne peut négliger face à la vitesse de la lumière. La précision relative des mesures de distance, quelques 10^{-11} , rend indispensable la prise en compte de la relativité dans la modélisation. Elle permet de tester la validité de ces principes. C'est ainsi que le principe d'équivalence se trouve vérifié aux incertitudes de mesures près pour des corps massifs comme la Terre et la Lune (voir encadré 4).

Vers un laser-Lune millimétrique

Toute cette richesse d'applications scientifiques montre l'importance de la télémétrie laser-Lune. Si la précision actuelle est entre deux et trois centimètres, elle peut être améliorée pour un coût rai-

sonnable et sans risque technologique pour n'être limitée que par l'atmosphère, soit à quelques millimètres pour une hauteur raisonnable de la Lune (voir encadré 1). C'est le but que l'équipe laser-Lune de l'OCA/CERGA s'est fixé pour les quatre ans qui viennent. Il correspond à faire passer l'équipement à une exactitude de deux millimètres environ. Ce projet devrait permettre de faire des mesures différentielles entre réflecteurs (les incertitudes sur l'atmosphère tendent à disparaître) au niveau de deux millimètres, donnant ainsi accès à une amélioration considérable de la connaissance des librations, des marées lunaires, et à des tests relativistes plus précis...

C'est donc une période de développement que va connaître la station pendant ces quatre ans, développement rendu difficile par le fait que nous devons en même temps continuer à engranger les observations. Si nous arrêtons, plus de données! (nous fournissons début 1992 plus de 90% des mesures acquises de par le monde). Cette amélioration de la précision passe par un raccourcissement des impulsions laser, une amélioration des systèmes de datation pour atteindre une dizaine de picosecondes, le passage à des détecteurs rapides dont les temps de transit soient stables. Il passe aussi par l'envoi de plusieurs impulsions (séparées de quelques nanosecondes) à chaque tir sous forme de train, si l'on veut maintenir le nombre de photons détectés en retour.

En filigrane derrière cette amélioration se profile un laser-Lune s'affranchissant de l'atmosphère, travaillant pour cela en deux longueurs d'onde au niveau de la picoseconde, et atteignant réellement le millimètre. Ce pourrait être pour le début du prochain millénaire.

Article proposé par Christian Veillet, Tél. (16) 93.36.58.49.

La station laser-Lune de l'OCA/CERGA est développée par :

*J.E. Chabaudie,
Ch. Dumoulin, D. Feraudy,
M. Glentzlin, J.F. Mangin,
J. Pham-Van, J.M. Torre,
Ch. Veillet.*

POUR EN SAVOIR PLUS

Alley (C.O.), Bender (P.L.), Currie (D.G.), Dicke (R.H.) et Faller (J.E.), «Some implications for physics and geophysics of laser range measurements from Earth to a lunar retro-reflector» *Proceedings of N.A.T.O. Adv. St. Inst. on Appl. of Modern Physics to the Earth and Planetary interiors*, S.K. Runcorn Ed., Wiley and Sons, London, 1969.
Shapiro (I.I.), Counselman (C.C.) et King (R.W.), «Verification of the principle of equivalence for massive bodies», *Phys. Rev. Lett.* 36, 551.
Mulholland (J.D.), «How high the Moon: A decade of laser ranging», *Sky and Telescope*, Oct. 80, 275.
Nordtvedt (K.), «Lunar laser ranging and laboratory Eötvös-type experiments», *Phys. Rev. D* 37, 1070.