

AVEC NOS ÉLÈVES

Utilisation de la télémétrie laser pour la détermination de la distance Terre-Lune

Gilles Bouteville

Cet article est l'adaptation d'un TPE réalisé en 2004. Il montre comment on peut utiliser simplement les vraies mesures des tirs lasers entre la Terre et la Lune. Il pourra donner des idées d'activité à des enseignants ou des élèves. Ces données sont toujours disponibles en ligne.

La télémétrie laser a démarré dans les années 1960, aux États-Unis et en France. Avec la création du site du plateau de Calern (CERGA) dans les années 70, elle s'est continuellement développée avec pour cibles la Lune (à partir de 1969) et les premiers satellites géodésiques, dont Starlette lancé par le CNES en 1975 (toujours poursuivi). En 1998, la télémétrie laser mondiale constituée d'une quarantaine de stations s'est constituée en service : l'International Laser Ranging Service (ILRS).

Principe d'une mesure

La télémétrie Laser est une technique indirecte de mesure des distances séparant une station au sol et un réflecteur laser placé sur la Lune. Une station comprend un laser de forte puissance, qui envoie une impulsion vers le réflecteur, un télescope chargé de recueillir la lumière réfléchie et un système de datation donnant la date du tir et le temps aller-retour de la lumière.

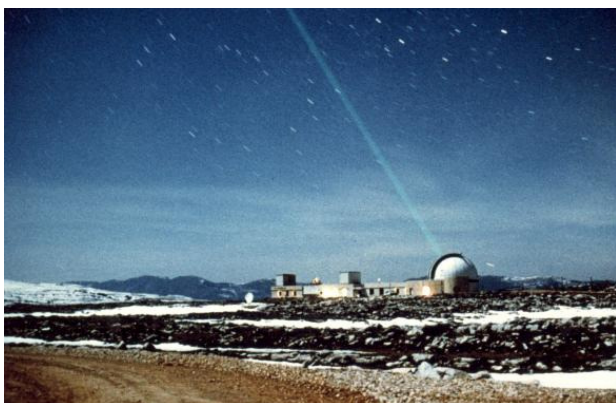


Fig.1. Tir laser sur la Lune depuis le plateau de Calern. (image observatoire de la Côte d'Azur).

L'avantage de cette technique se situe dans la simplicité du concept de la mesure (mesure du temps de trajet d'une impulsion lumineuse) et dans son exactitude.

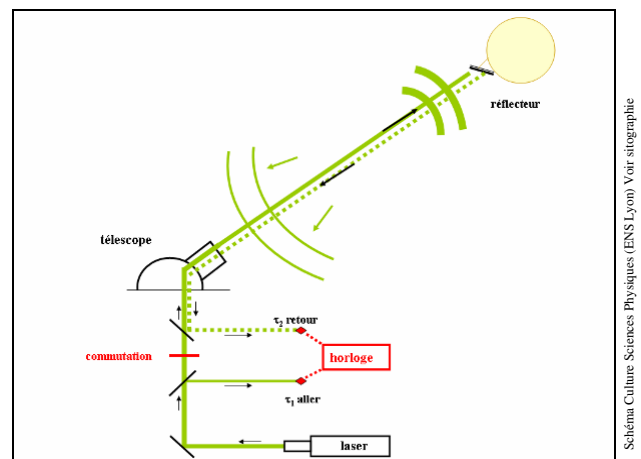


Fig.2. Schéma de principe de la télémétrie laser.

Elle utilise des rétro-réflecteurs, qui ont été déposés par les missions Apollo (USA) et Luna (URSS) entre 1969 et 1973.

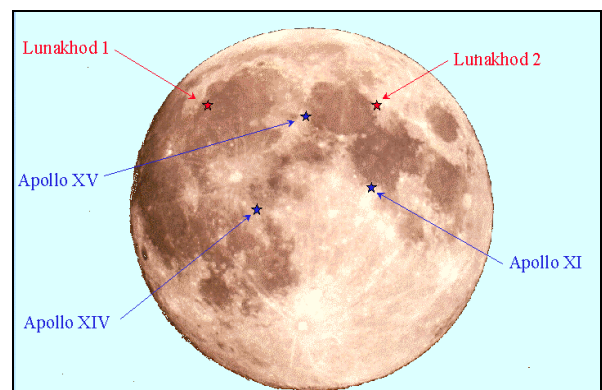


Fig.3. Position des réflecteurs laser sur la Lune.

Schéma Culture Sciences Physiques (ENS Lyon) Voir stirographie

Observatoire de la Côte d'Azur

Acquisition des mesures

Les données proviennent de l'Observatoire de la Côte d'Azur. Elles sont toujours disponibles à l'adresse : www-g.oca.eu/gemini/donnees/las_lune/ptn.htm.

Une ligne représente un point normal. C'est-à-dire une mesure.

Un point normal est le temps du trajet aller-retour de la lumière à un instant t entre un point de référence de la station et un réflecteur, calculé à partir d'un certain nombre de mesures.

Exemple de ligne (ancien format international jusqu'en 1999)

511998213223121731439026629923314973301910 80 1029 11 88610 11519 5320a 524

Explication du format (avec le nombre de caractères utilisés) :

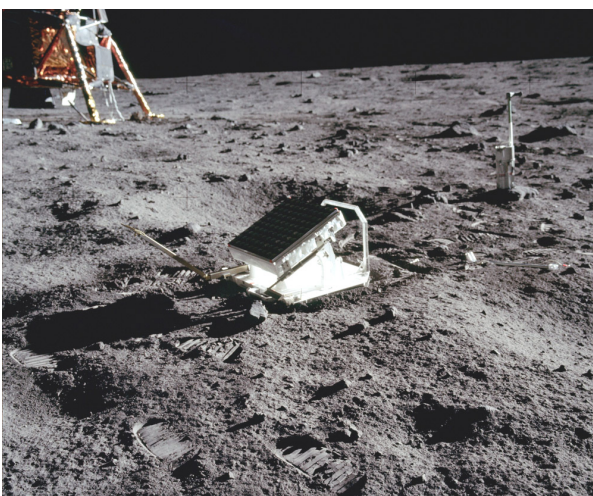
5	Identification du format	1 car.
1	Couleur du laser 1 = vert, 2 = infrarouge	1 car.
19980213	Date (année mois jour)	8 car.
2231	Heures minutes	4 car.
217314390	Secondes (au moment du tir). L'unité est la centaine de nanoseconde	9 car.
26629923314973	Mesure. L'unité est le dixième de picoseconde.	14 car.
3	Réflecteur (0 = Apollo XI 2 = Apollo XIV 3 = Apollo XV 4 = Lunakhod 2)	1 car.
01910	Site d'observation (ici l'OCA/CERGA)	5 car.
080	Nombre d'échos pour le point normal	3 car.
001029	Incertitude estimée (l'unité est le dixième de picoseconde)	6 car.
011	Signal/bruit estimé (unité = 0,1)	3 car.
1 caractère blanc		1 car.
088610	Pression atmosphérique (unité = 0.01 mbar)	6 car.
0115	Température atmosphérique (unité = 0,1 °C)	4 car.
19	Humidité en pourcentage	2 car.
05320	Longueur d'onde du laser (unité = 0,1 nm)	5 car.
a	Version du fichier	1 car.
0524	Durée de la série en secondes	4 car.

L'information essentielle est la durée du trajet aller retour des photons (ligne verte) :

2662992331497,3. 10^{-12} s soit 2,6629923314973 s

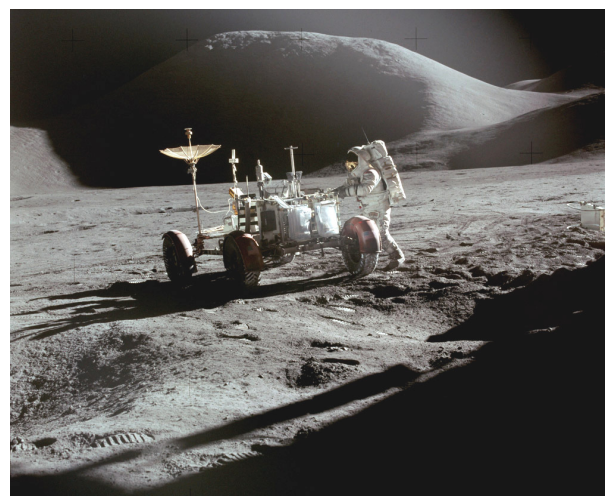
Après 1999 et jusqu'en 2005 (cessation de l'activité) le format change légèrement. 14 caractères à partir de la 19^e position donnent la valeur de la mesure du temps (en vert dans l'exemple ci-dessous) :

512005073004101308**28802258797024**75847301910028003583021087359+175365320a053



Crédit NASA

Fig.4. Le réflecteur déposé par Apollo 11.



Crédit NASA

Fig.5. La mission Apollo 15 a aussi déposé un réflecteur.

Exemple d'étude à réaliser à partir de ces données.

Travail préliminaire

1. Déterminer une distance, connaissant la vitesse de la lumière : $c = 299\,792\,458 \text{ m.s}^{-1}$.
2. Évaluer la précision sur la mesure du temps permettant de déterminer :
 - a. Une distance exprimée avec différentes unités (km, m, ...)
 - b. Une distance compatible avec l'échelle choisie pour représenter l'orbite.

Tracé de l'orbite de la Lune

1. Choisir un ensemble de dates correspondant à une lunaison. Pour chacune déterminer le temps «de vol des photons ». On fera éventuellement une moyenne lorsque plusieurs mesures sont disponibles pour la même date.
2. Calculer les distances correspondantes.
3. Déterminer l'ordre de grandeur de l'apogée et du périégée. En déduire un choix d'échelle.
4. Évaluer la vitesse angulaire orbitale de la Lune, supposée constante (on fait ici une approximation assez importante puisque cette vitesse varie de plus de 10 %).
5. Relever les dates de la nouvelle Lune et de la pleine Lune par exemple sur : <ftp://ftp.imcce.fr/pub/ephem/moon/moonphas/>
6. Choisir une origine (nouvelle Lune par exemple) et réaliser la graduation en jours correspondante.
7. Tracer les directions des rayons correspondant aux différentes dates. Reporter les longueurs associées.
8. Tracer l'orbite de la Lune.
9. Conclure sur la forme de l'orbite lunaire.

Pour aller plus loin

(activités complémentaires)

1. Relever dans les éphémérides les dates de passage à l'apogée et au périégée : http://www.imcce.fr/fr/ephemerides/formulaire/form_ephphys.php
Comparer avec vos estimations.
Question possible : existe-t-il une relation entre pleine Lune, nouvelle Lune et apogée périégée ?
2. Comparer les résultats obtenus avec les estimations réalisées à partir des fiches CLEA – BELIN, ou de photographies prises au cours d'une lunaison.

Exemple de calcul

Date 18/07/1990

$$t = 2,406\,044\,851\,435$$

$$\begin{aligned} \text{distance} &= 2,406\,044\,851\,435 \times 299\,792\,458 / 2 \\ &= 360\,657\,050,034\,9 \text{ m} \\ &= 3,606\,570\,500\,349 \cdot 10^8 \text{ m} \end{aligned}$$

(/2 : il faut penser qu'il y a un aller et un retour)
soit 360 657 km
360 657 050 m
360 657 050 035 mm

On peut rechercher quelle incidence a la précision de la mesure du temps sur le résultat :

Avec une précision de la milliseconde
 $2,406 \times 299\,792\,458 / 2 = 3,607 \cdot 10^8 \text{ m}$
Erreur de 7 km sur la distance (erreur de 2.10^{-5})

Avec une précision de la microseconde
 $2,406\,044 \times 299\,792\,458 / 2 = 3,606\,569 \cdot 10^8 \text{ m}$
soit 360 657 km
Précision de l'ordre de l'hectomètre.

Avec une précision de la nanoseconde
 $2,406\,044\,851 \times 299\,792\,458 / 2$
 $= 3,606\,570\,50 \cdot 10^8 \text{ m}$ soit 360 657 050 m
Précision de l'ordre du mètre

La précision du millionième de seconde est nécessaire pour une détermination de la distance en kilomètres.

En changeant de date, on remarque les variations de la distance Terre - Lune :

Date 10/07/1990

$$\begin{aligned} &2,579\,243\,127\,355 \times 299\,792\,458 / 2 \\ &= 3,866\,188\,184\,115 \cdot 10^8 \text{ m} \quad \text{soit } 386\,619 \text{ km} \end{aligned}$$

Sitographie

Sur le site de l'observatoire de la Côte d'Azur, on trouve, en plus des mesures, de nombreux renseignements sur cette expérience.
wwwrc.obs-azur.fr/cerga/laser/laslune/llr.htm

Le site Culture Sciences Physiques (ENS de Lyon) propose un dossier consacré au laser lune avec de nombreux détails techniques que ce soit sur le laser ou sur la correction nécessaire à la traversée de l'atmosphère...

http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/XML/db/csphysique/metadata/LOM_CSP_laser-distance-terre-lune.xml