ANALYSE DES DONNÉES DU LASER - LUNE

J. Chapront, M. Chapront-Touzé, G. Francou

Introduction

Le principe des observations est le suivant : l'émetteur de la station envoie des photons en direction d'un réflecteur situé sur la Lune ; les photons réfléchis sont captés par un récepteur, en général voisin de l'émetteur, et le temps du trajet aller et retour de la lumière est chronométré. L'observation brute consiste dans ce temps dépouillé de corrections instrumentales ; par exemple, pour la plupart des stations, élimination du trajet de la lumière à l'intérieur de l'appareil pour pouvoir confondre émetteur et réflecteur. Les stations convertissent ensuite les observations brutes en points normaux, c'est-à-dire en moyennes d'observations sur une dizaine de minutes (ou quelques dizaines), ce qui permet de diminuer certaines erreurs. Ces points normaux peuvent être analysés comme s'il s'agissait d'observations réelles et nous les désignerons dans la suite par "observations". Leur précision, pour les observations les plus récentes, est de l'ordre de quelques dizaines de picosecondes, ce qui correspond à quelques millimètres sur un trajet simple. La valeur de la mesure elle-même est de l'ordre de 2.5 secondes.

Les réflecteurs utilisés sont au nombre de quatre : Apollo 11, Apollo 14, Apollo 15 et Lunakhod 2, Apollo 15 étant plus souvent utilisé que les autres réflecteurs pour des raisons de facilité de repérage. Il existe également un autre réflecteur, Lunakhod 1, dont on ne connaît pas l'emplacement.

Les principales stations sont au nombre de trois : McDonald, près de Fort Davis aux USA, qui a eu trois emplacements successifs, Haleakala (Mauï, Hawaii), qui ne fonctionne plus depuis août 1990 et pour laquelle l'émetteur et le récepteur étaient séparés par une vingtaine de mètres, et le CERGA (Grasse, France), qui fournit actuellement le plus grand nombre d'observations. Il faut ajouter à ces stations la station allemande de Wetzell qui ne fournit que quelques points normaux par an. La table 1 donne le nombre d'observations disponibles pour les principaux sites, jusqu'à la fin septembre 1996, et les intervalles de temps couverts.

Principe de l'analyse

Soit DT le temps aller et retour des photons observé en TAI (déduit des fichiers de points normaux). La valeur calculée correspondant à DT est DTC . L'analyse des observations se fait par l'intermédiaire des O-C :

$$O - C = DT - DTC$$

Table 1. Observations disponibles jusqu'au 30 septembre 1996.

Station	début	fin	nombre
McDonald 2.70m	août 1969	janv. 1985	3559
MLRS ancien	août 1983	janv. 1988	483
MLRS nouveau	fév. 1988	sept. 1996	1385
Haleakala	avril 1987	août 1990	482
CERGA rubis	avril 1984	juin 1986	1190
CERGA	oct. 1987	sept. 1996	4230

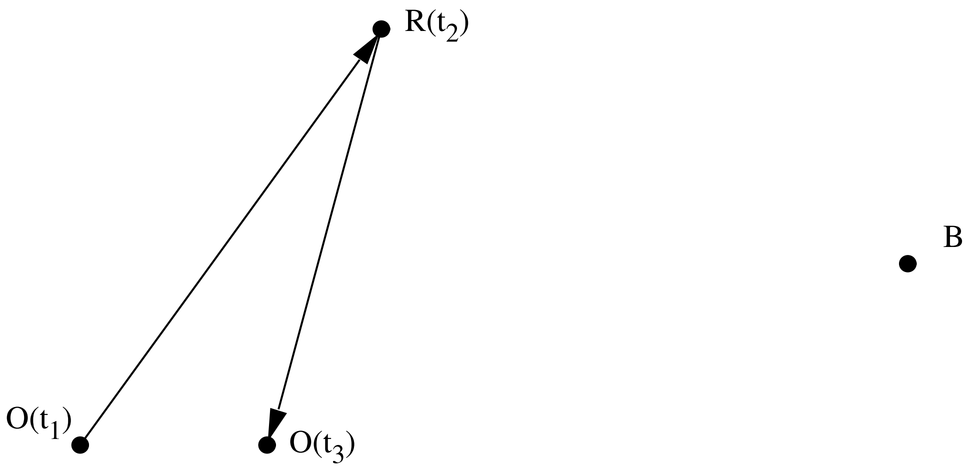

Fig. 1. Trajet des photons. B : barycentre du système solaire, R : réflecteur, O : site d'observation (émetteur et récepteur confondus).

L'expression de DTC est obtenue de la façon suivante. Les photons quittent la station à l'instant t_1, arrivent sur le réflecteur à l'instant t_2 et reviennent à la station à l'instant t_3 (fig. 1). On a :

$$t_2 = t_1 + \frac{1}{c}|\mathbf{BR}(t_2) - \mathbf{BO}(t_1)| + DT_3 + DT_4,$$

$$t_3 = t_2 + \frac{1}{c}|\mathbf{BR}(t_2) - \mathbf{BO}(t_3)| + DT_3 + DT_4$$

avec DT_3 : correction relativiste pour l'aller ou le retour seul (déviation gravitationnelle des rayons lumineux), DT_4 : correction troposphérique pour l'aller ou le retour seul.

t_1, t_2 et t_3 sont exprimés dans l'échelle TDB. t_1 est donné avec l'observation en UTC puis converti en TDB. t_2 et t_3 sont calculés par itération. On en déduit :

$$DTC = t_3 - t_1 - DT_1(t_3) + DT_1(t_1)$$

$DT_1(t)$: correction d'échelle de temps.

Le calcul de DTC fait intervenir la distance des positions barycentriques du réflecteur et du site d'observation à deux instants différents t et t'. Pour relier cette quantité à des quantités connues, on fait intervenir la position barycentrique du centre de gravité du système Terre-Lune **BG**, la position géocentrique du centre de gravité de la Lune **TL**, la position géocentrique de l'observateur **TO** et la position sélénocentrique du réflecteur **LR** (fig. 2). On obtient :

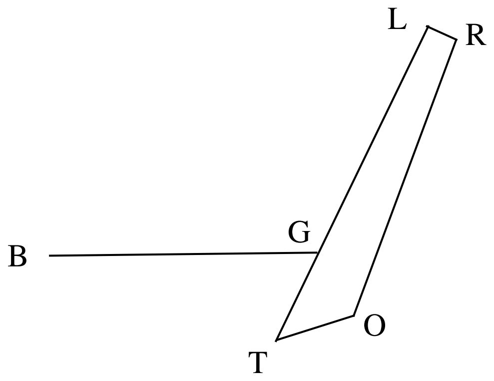

Fig. 2. Positions du réflecteur et du site. **G** : centre de gravité du système Terre-Lune, **T** : centre de gravité de la Terre, **L** : centre de gravité de la Lune.

$$|\mathbf{BR}(t) - \mathbf{BO}(t')| = \left|\mathbf{BG}(t) - \mathbf{BG}(t') + \frac{m_T}{m_T + m_L}\mathbf{TL}(t) + \frac{m_L}{m_T + m_L}\mathbf{TL}(t') + \mathbf{LR}(t) - \mathbf{TO}(t')\right|.$$

Le calcul de cette quantité nécessite que les composantes des différents vecteurs soient exprimées dans le même repère. Nous avons choisi un repère écliptique moyen inertiel J2000.0.

$\mathbf{BG}(t) - \mathbf{BG}(t')$ est calculé à l'aide d'une solution du barycentre Terre-Lune, DE245 ou VSOP87.

$\mathbf{TL}(t)$ est donné par notre solution ELP 2000-96 (solution analytique + compléments numériques), dans laquelle divers paramètres peuvent être ajustés.

$\mathbf{LR}(t)$ est calculé à partir des coordonnées des réflecteurs, dans un repère sélénocentrique (ajustées) et d'une rotation fournie par la théorie analytique de la libration de M. Moons, dans laquelle les constantes de la libration libre doivent être ajustées.

Le calcul de $\mathbf{TO}(t)$ fait intervenir les coordonnées des stations dans le repère terrestre de l'IERS avec leurs vitesses (mouvement des plaques tectoniques) d'après ITRF94 , des corrections aux coordonnées de la station dues aux déformations de la Terre, la matrice de passage du repère terrestre au repère céleste écliptique dans le cadre newtonien et enfin des corrections relativistes de changement de repère.

Le passage du repère terrestre au repère céleste écliptique se fait selon le schéma classique :

ITRF94 $\xrightarrow{\ 1\ }$ repère équatorial vrai de la date $\xrightarrow{\ 2\ }$ repère équatorial J2000.0 $\xrightarrow{\ 3\ }$ repère écliptique.

- La transformation 1 fait intervenir le mouvement du pôle et la différence $UT1-UTC$ calculés par interpolation à partir du fichier EOP 97 C04 de l'IERS.

- La transformation 2 fait intervenir la précession-nutation, évaluée soit à partir d'un modèle analytique en ajustant la constante de la précession, soit à partir des corrections numériques fournies par le fichier EOP 97 C04.

- La transformation 3 fait intervenir la position du repère dynamique écliptique par rapport au repère équatorial définie par les deux angles ajustés $\gamma'\gamma^I_{2000}$ et ε_0. γ' est l'équinoxe du repère équatorial J2000.0 défini implicitement par les paramètres de la rotation de la Terre et le modèle de précession-nutation utilisés, γ^I_{2000} est l'équinoxe dynamique moyen inertiel J2000.0, qui dépend de l'équateur utilisé, ε_0 est l'obliquité moyenne en J2000.0 (fig. 3).

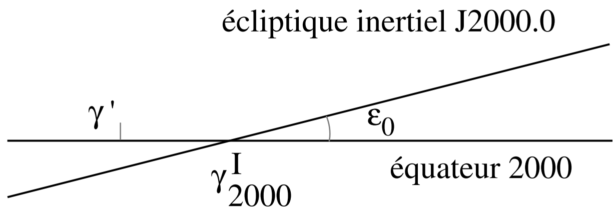

Fig. 3. Positionnement du repère écliptique par rapport au repère équatorial.

Types d'analyse effectués

Nous effectuons deux types d'analyse, chaque type correspondant à des buts différents.

Analyses à long terme

Les plus récentes utilisent les observations de janvier 1972 à fin septembre 1996. Les O-C obtenus sont analysés par la méthode des moindres carrés pour déterminer les paramètres suivants :

- six éléments orbitaux de la Lune (moyen mouvement sidéral, paramètres excentricité et inclinaison, valeurs de la longitude moyenne et des longitudes moyennes du périgée et du nœud en J2000.0),

- quatre éléments orbitaux du barycentre Terre-Lune (moyen mouvement sidéral, paramètre excentricité, longitude moyenne et longitude moyenne du périhélie en J2000.0),

- l'accélération séculaire de la Lune provenant des effets de marées,

- des corrections observées aux moyens mouvements du périgée et du nœud, qui peuvent contenir les effets principaux, sur le mouvement orbital, de certaines constantes non ajustées,

- les six constantes de la libration libre,

- les angles de position du repère écliptique moyen inertiel J2000.0 par rapport à un repère céleste équatorial J2000.0, $\gamma'\gamma^I_{2000}$ et ε_0,

- une correction à la constante de la précession.

Pour le positionnement du repère écliptique par rapport au repère équatorial, nous avons considéré deux cas :

• Les O-C sont calculés à partir d'un modèle analytique de précession-nutation ; le repère équatorial de référence est alors défini par le CEP moyen de J2000.0 et un équinoxe γ' du plan équatorial correspondant qui dépend des valeurs de UT1 de l'IERS. La position du CEP moyen de J2000.0 et γ' dépendent également du modèle de précession choisi et nous avons étudié deux modèles : celui du Bureau des longitudes (Simon et al., 1994) et celui de Williams (1994) qui est une amélioration du précédent. La correction à la constante de la précession que nous ajustons est une correction à la constante UAI 1976.

• Les O-C sont calculés à partir des corrections de précession-nutation numériques fournies par l'IERS ; le repère équatorial de référence est alors le repère céleste de l'IERS. La correction à la constante de la précession que nous ajustons est très petite et n'a qu'une valeur de vérification.

La comparaison des éléments orbitaux de la Lune déterminés dans les deux cas permet de calculer la séparation dans l'écliptique entre les deux équinoxes dynamiques obtenus. La comparaison avec des résultats d'ajustements antérieurs de notre solution sur des intégrations numériques du JPL permet également de positionner les repères de ces intégrations numériques par rapport au repère de l'IERS.

Les résidus obtenus, par stations et par intervalles de temps, sont donnés dans la table 2.

Table 2. Résidus après ajustement, en cm sur la distance station-réflecteur.

Stations	observations retenues	moyenne quadratique (cm)
McDonald 1972-1986	3512	35.0
McDonald 1987-1996	1387	5.2
CERGA, Rubis 1984-1986	1165	19.5
CERGA 1987-1996	4087	5.4
Haleakala 1987-1990	459	9.2

Analyses à court terme

Les valeurs des paramètres ajustés dans les analyses précédentes, une fois injectées dans les différentes solutions utilisées, permettent d'effectuer un calcul précis des O-C des observations à mesure qu'elles paraissent. Ce travail est effectué actuellement avec les observations du CERGA qui nous sont envoyées par groupes de quelques nuits au fur et à mesure de leur réalisation. Il n'est plus possible à ce niveau d'utiliser le fichier EOP 97 C04, dont la mise à jour n'est en général pas encore faite ; on utilise alors les données du Bulletin A de l'IERS (USNO), qui sont soit des prédictions soit des résultats issus d'observations. Les O-C que nous obtenons sont envoyés immédiatement au CERGA en assurant ainsi un suivi à court terme des observations.

Ce travail a, en outre, pour nous un grand intérêt qui est de permettre un examen critique de diverses corrections introduites dans le calcul des O-C. Dans l'analyse à long terme, les effets de ces corrections sont en effet noyés dans la masse des données traitées. C'est ainsi que nous avons pu corriger, il y quelques mois, une imprécision dans notre évaluation de l'effet troposphérique et que nous allons tester prochainement un nouveau modèle pour ce même effet.

Ces O-C à court terme pourraient également nous permettre de réaliser un ajustement de UT0 et de la variation de latitude, mais nous n'en sommes actuellement qu'à des essais. Par ailleurs on sait que les valeurs que l'on peut déduire des observations LLR sont beaucoup moins précises que celles issues d'autres types d'observations, par exemple le VLBI.

La figure 4 montre un exemple d'analyse à court terme, utilisant exceptionnellement le fichier EOP 97 C04 de l'IERS. Sur cette figure, les + correspondent au réflecteur Apollo 15, les X à Apollo 11 et le triangle à Lunakhod 2.

Liens de l'équipe avec l'extérieur

Nous avons parlé plus haut des échanges que nous avons régulièrement avec l'équipe LLR du CERGA. Ces échanges sont maintenant "institutionnalisés" dans le cadre du GRGS et nous figurerons dans le prochain rapport annuel sous le titre "Centre d'analyse de l'équipe laser-Lune, BDL et Observatoire de Paris". Jean Souchay et son étudiant Sébastien Bouquillon se sont en effet joints à notre équipe et travaillent actuellement à l'amélioration du modèle de libration.

Par ailleurs, le positionnement du repère écliptique par rapport au repère céleste de l'IERS, que nous avons déterminé, rentre dans le cadre des travaux qui concernent l'IERS et notre équipe figure maintenant sous le nom de "BDL Analysis Centre" parmi les centres d'analyse LLR répertoriés par l'IERS.

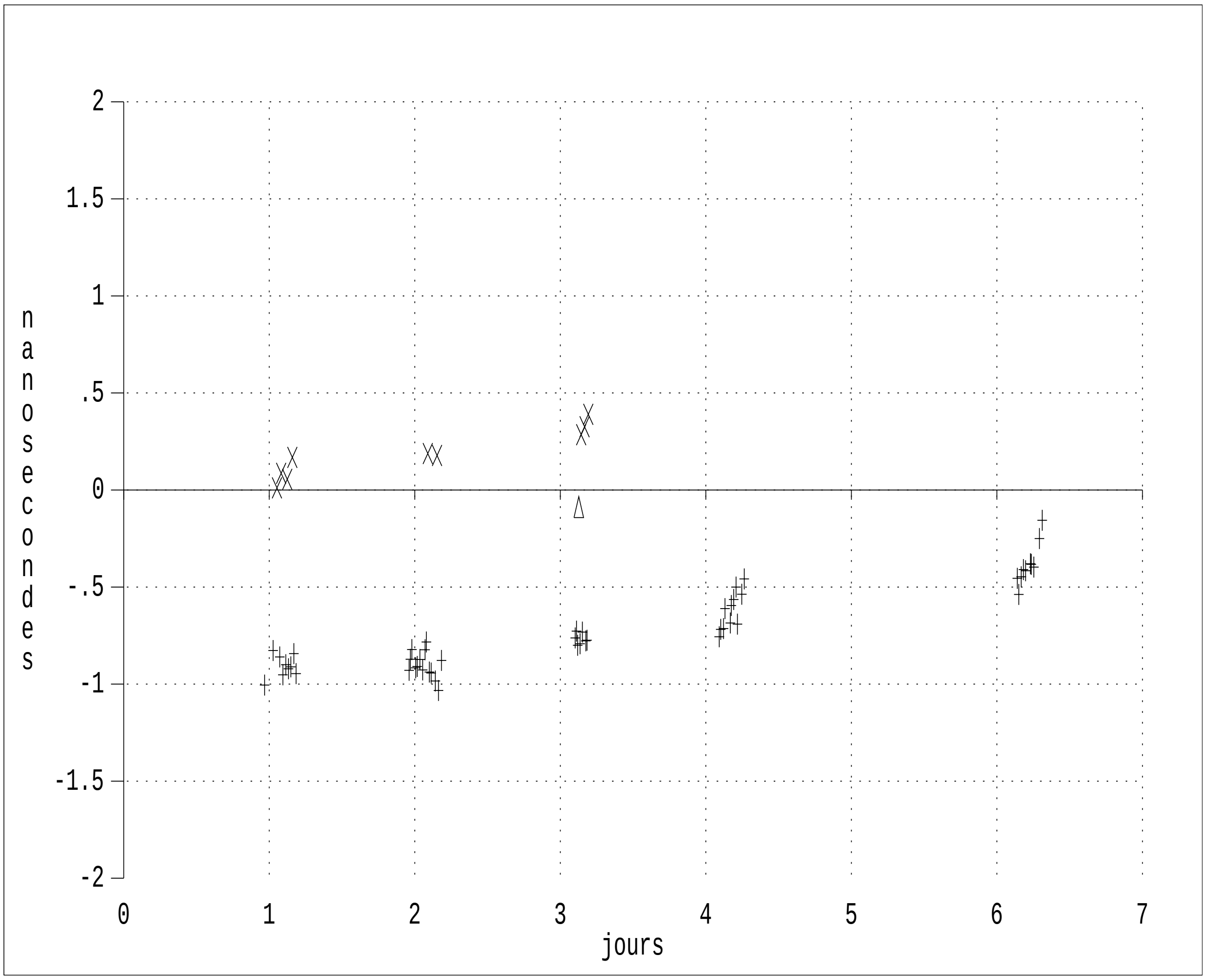

Fig. 4. O–C du 26/03/1997 au 1/04/1997, au CERGA.