

APPORT DES OBSERVATIONS D'OCCULTATIONS STELLAIRES EN VUE DU
RATTACHEMENT DU SYSTEME DYNAMIQUE AU SYSTEME GEOMETRIQUE.

M. Froeschlé et C. Meyer
C.E.R.G.A., Grasse (France)

ABSTRACT. The possibilities of tying the geometrical and dynamical reference frames by use of lunar occultations are reviewed. Actually, the best accuracy available is about $0''.4$, essentially limited by stellar positions and limb corrections. One can expect an improvement of one order of magnitude with the accomplishment of POLO and HIPPARCOS Projects.

INTRODUCTION

Au mois d'août 1969, a été obtenue la première détermination de la distance Terre-Lune par télémétrie laser. La précision des mesures surpassait celle dont on disposait jusque là par la technique radar. C'est pourquoi il devenait possible d'améliorer le système de référence dynamique par des mesures de ce type. Ce système dynamique planétaire repose sur l'intégration des équations différentielles régissant le mouvement de quelques planètes et de la Lune par rapport à un repère galiléen. Dans ce système, la représentation du mouvement de la Lune à partir d'observations de distances faites depuis la Terre nécessite une modélisation poussée des forces agissantes et des paramètres physiques de la Terre et de la Lune. Cependant, l'utilisation des seules mesures de distance rend le système Terre-Lune aveugle, c'est à dire sans possibilité de rattachement au système géométrique. Ce dernier est défini par des directions fixes matérialisées par les directions d'étoiles repérées par rapport à des objets extrêmement éloignés et dont les mouvements propres sont négligeables (galaxies lointaines).

Notre propos est de passer en revue les techniques de rattachement du système Terre-Lune au système géométrique en analysant plus particulièrement celle du positionnement de la Lune par rapport aux étoiles par l'observation d'occultations.

Lors des vols Apollo 16 et 17, deux émetteurs ont été déposés à la surface de la Lune (ALSEP). Les techniques d'interférométrie à longue base permettent de rattacher leurs directions à des radio-sources

naturelles avec une précision d'ensemble de l'ordre de $0'',001$ (Slade, 1977 ; Baudry, 1979). Si l'on sait par ailleurs raccorder ces radio-sources au système géométrique, ce qui peut être obtenu par des mesures interférométriques en cascade (Kovalevsky, 1975), le système dynamique sera rattaché au système géométrique. Notons enfin qu'on ne connaît qu'une quarantaine de sources qui permettent d'accomplir ce processus.

Remarquons dès à présent qu'un grand nombre de techniques de rattachement utilisent le système terrestre comme intermédiaire. La position de la Terre peut être déterminée soit par des procédés astrométriques classiques (astrolabe, PZT), soit par interférométrie à très longue base (VLBI). Dans tous ces cas, le système terrestre se trouve rattaché au système géométrique. Les réseaux obtenus par l'un ou l'autre de ces procédés peuvent être étendus par télémétrie laser sur satellite ou par des observations Doppler.

On conçoit donc que les mesures de distance Terre-Lune effectuées par télémétrie laser dans le système terrestre puissent être elles-mêmes rattachées au système géométrique. C'est ainsi que la campagne internationale de mesure de la rotation de la Terre par télémétrie laser (EROLD) a été entreprise depuis 1977, conduisant à une précision de l'ordre de la milliseconde dans la détermination du temps universel (Valein, 1979).

Il existe d'autres techniques pour effectuer ce rattachement :

- La photographie de la Lune sur fond d'étoiles : compte tenu des difficultés pour l'obtention des clichés et pour la réduction, des erreurs actuelles des catalogues stellaires, on ne peut espérer faire un rattachement à mieux que $0'',3$.
- Les observations méridiennes de la Lune ont été utilisées (Klock, 1970 ; Yasuda, 1971) pour orienter le système FK 4 tout en déterminant de nouveau les paramètres orbitaux de la Lune. Les difficultés de pointage sont telles que la précision d'une mesure est de l'ordre de $0'',8$.
- Les occultations d'étoiles par la Lune : dans ce cas, on lie la direction de l'étoile occultée (système géométrique) à la direction Terre-Lune (matérialisant, en l'occurrence, le système dynamique). Cette technique a servi successivement à la détermination de longitudes terrestres (XVIII^e siècle), à l'étude du mouvement orbital de la Lune et, en particulier, à la détermination de son accélération séculaire. Avant l'introduction du Temps Atomique, elle permettait une lecture du Temps des Ephémérides. Puis, par l'analyse de longues séries d'observations, elle a permis un calage du système FK 4 (Morrison, 1979). Plus généralement, cette technique permet un positionnement des astres occultés avec une précision qui dépend évidemment des éphémérides dont on dispose et de la connaissance de la topographie lunaire. Par exemple, le projet EXOSAT (E.S.A.) a pour but de déterminer les

dimensions, mais aussi les positions de sources de rayonnement X à partir d'occultations observées depuis un satellite.

Nous allons examiner plus en détail l'état actuel et les perspectives de rattachement des systèmes dynamique et géométrique par occultations stellaires.

1. POSITION DU PROBLEME

A l'instant d'une occultation, la direction observateur-étoile tangente en (P) le disque apparent de la Lune. Il s'agit de relier entre eux les vecteurs (figure 1) qui définissent :

- la position de l'observateur (O) par rapport à un système lié à la Terre,
- la direction ($\vec{\Gamma}$) centre des masses de la Terre - centre des masses de la Lune,
- la direction ($\vec{\Delta}$) centre des masses de la Lune - point où se produit l'occultation,
- la direction ($\vec{\gamma}$) de l'étoile occultée.

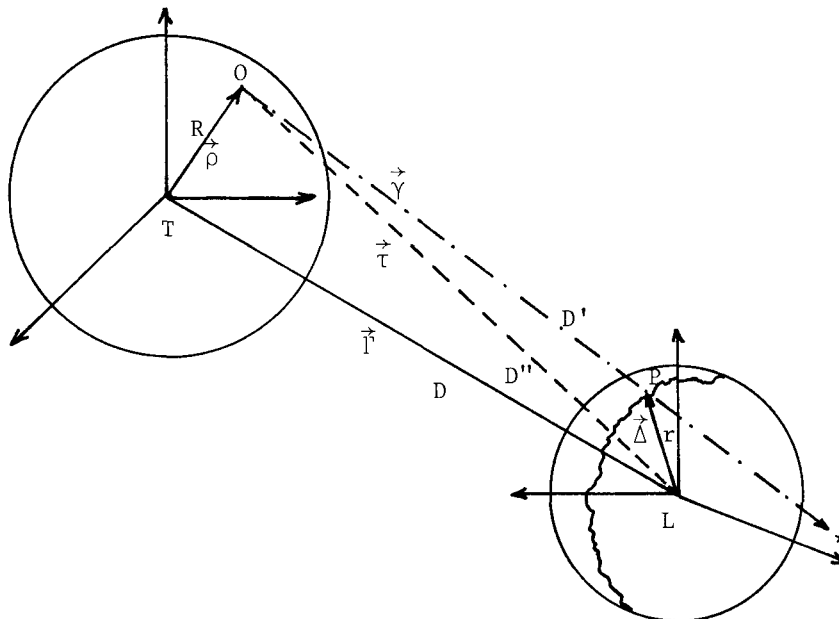


Figure 1.

Soit $\vec{\tau}$ la direction OL. Dans les triangles OTL et OLP, nous pouvons écrire les relations vectorielles suivantes :

$$D'' \vec{\tau} = -R \vec{\rho} + D \vec{\Gamma} \quad (1)$$

où D'' , R et D sont respectivement les distances observateur-centre Lune, observateur-centre Terre et centre Terre-centre Lune.

$$D'' \vec{\tau} = D' \vec{\gamma} - (r + \epsilon) \vec{\Delta} \quad (2)$$

où ϵ correspond à l'élévation du point (P) au-dessus de la sphère de référence de rayon r .

Le vecteur $\vec{\Gamma}$ est une direction du système dynamique alors que le vecteur $\vec{\gamma}$ est une direction du système géométrique. Le vecteur $\vec{\tau}$ est une direction intermédiaire qui sert au rattachement. L'équation (1) montre que la direction du vecteur $\vec{\tau}$ dépend de l'éphéméride lunaire par le vecteur $\vec{\Gamma}$ et de la position de l'observateur par le vecteur $\vec{\rho}$. Par ailleurs, dans l'équation (2), $\vec{\tau}$ apparaît comme fonction de la position de l'étoile occultée et des paramètres qui fixent par rapport au système sélénodésique la direction $\vec{\Delta}$ (librations optiques et physiques). La précision avec laquelle ces différents paramètres sont connus a évolué rapidement ces dernières années, tant par l'apport de nouvelles techniques d'observation que par l'usage de moyens de calcul importants.

2. LE RATTACHEMENT.

La donnée brute d'une observation d'occultation est l'instant du phénomène. La précision de cette datation varie dans d'importantes limites selon la technique d'observation utilisée. Elle est typiquement de $\pm 0^s,5$ pour des observations visuelles, de $\pm 0^s,1$ par l'utilisation du micromètre à double image (Meyer, 1974) et de $\pm 0^s,001$ par les techniques photoélectriques (Nather, 1970 ; de Vejt, 1976). Dans ce dernier cas, l'incertitude sur la datation peut être considérée comme faible devant celles qui affectent les autres paramètres du phénomène liés par les équations (1) et (2). L'équation (1) exprime le passage des coordonnées géocentriques de la Lune à ses coordonnées topocentriques. La position de la station par rapport à l'axe instantané de rotation et l'équateur vrai est connue avec une précision plus ou moins grande selon les stations. Par l'analyse d'occultations des Pléiades observées à partir de plusieurs stations (Morrison, 1971), on a pu évaluer à $\pm 0'',1$ l'incertitude sur la position de l'observateur, ce qui correspond, pour la distance moyenne Terre-Lune, à ± 200 mètres environ. Cependant, pour des stations raccordées aux systèmes internationaux, la précision est actuellement de 5 à 10 mètres, compte tenu des écarts systématiques entre les différents réseaux disponibles obtenus à partir de techniques telles que Doppler, VLBI, laser. Dans l'avenir, on peut espérer une nette amélioration sur ce paramètre par une meilleure modélisation des phénomènes de marées terrestres et du déplacement relatif des plaques tectoniques (Kovalevsky, 1979).

Les coordonnées géocentriques de la Lune (\vec{T}) sont données par les éphémérides. On utilise actuellement l'éphéméride $j = 2$ basée sur la théorie de Brown modifiée. Les réductions effectuées dans ces conditions (Morrison, 1971) font apparaître une incertitude de $\pm 0'',16$ sur la position de la Lune, soit ± 320 mètres à la distance moyenne Terre-Lune. Un grand effort a été accompli pour améliorer cette situation. On peut disposer aujourd'hui d'éphémérides obtenues par intégration numérique (LURE 2) et dont la précision peut être estimée à quelques dizaines de mètres sur la période de validité de cette intégration. Les éphémérides les plus récentes (CERGA-TEXAS, JPL) rendent compte des observations laser-Lune à mieux que $0'',001$, soit ± 2 mètres à la distance Terre-Lune, cela dans le système de référence propre à l'éphéméride utilisée.

L'équation (2) fait intervenir, outre la direction topocentrique de la Lune, la direction de l'étoile observée et celle sélénocentrique, du point où se produit l'occultation. Si l'on multiplie vectoriellement chacun des membres de l'équation (2) par le vecteur $\vec{\gamma}$, il vient :

$$D''\vec{t} \wedge \vec{\gamma} + (r + \epsilon) \vec{\Delta} \wedge \vec{\gamma} = \vec{0} \quad (3)$$

Les directions $\vec{\gamma}$ sont extraites des catalogues stellaires. Les plus usuels (S.A.O., AGK 3, Z.C.) ont aujourd'hui une cohérence interne de l'ordre de $0'',4$. Pour le S.A.O., le nombre d'étoiles occultables est de l'ordre de 105.000 jusqu'à la magnitude visuelle 9. On gagne évidemment en précision par l'usage des catalogues FK4 et Sup. dont les positions stellaires sont données à $\pm 0'',1$ près ; mais ces catalogues ne comportent que des étoiles brillantes dont seulement 1500 sont occultables. Le projet HIPPARCOS (ESA, 1979) accepté par l'ESA, fournira un catalogue de 100.000 étoiles environ avec une erreur probable sur les positions de $\pm 0'',002$ à la date d'observation. L'incertitude sur les mouvements propres entraînera une dégradation de $0'',002$ par an. Parmi les étoiles de ce catalogue, 30.000 environ seront occultables jusqu'à la magnitude visuelle 9. Remarquons que ce catalogue définit un système géométrique "libre" qu'il faudra rattacher à des directions fixes (sources extragalactiques) (Kovalevsky, 1975).

Le vecteur $(r + \epsilon) \vec{\Delta}$ d'origine (L), centre des masses de la Lune, a pour extrémité le point de la surface lunaire où disparaît l'étoile pour l'observateur (O). L'élévation ϵ de ce point rapportée au contour moyen défini par les librations topocentriques l , b , se lit dans les atlas de profils lunaires. Les profils sont orientés par rapport à la projection de l'axe de rotation de la Lune sur le plan du contour moyen : l'angle de position du point est compté positivement vers l'Est. Le profil apparent se compose de la projection d'accidents du relief qui, selon leur altitude réelle, peuvent se trouver à ± 180 km du contour moyen (Weimer, 1954). Cette projection fait que l'on peut considérer au premier ordre près, les deux vecteurs $\vec{\Delta}$ et $\vec{\gamma}$ perpendiculaires. L'équation (3) s'écrit alors :

$$\left[\cos(\delta) \cos(\delta_*) (\alpha - \alpha_*)^2 + (\delta - \delta_*)^2 \right]^{1/2} - (r + \epsilon) = \sigma \quad (4)$$

où α, δ sont les coordonnées topocentriques de la Lune,
 α_*, δ_* sont les coordonnées de l'étoile.

L'écart entre les deux systèmes est alors donné à l'instant de l'occultation par σ . Cet écart est dû pour une grande part à l'imprécision des atlas. Actuellement, on dispose de deux atlas de profils : l'Atlas de profils lunaires (Weimer, 1952) et The marginal zone of the Moon (Watts, 1963), tous deux obtenus à partir de clichés photographiques. Ces profils se réfèrent dans le cas de Weimer au centre de figure de la Lune et au centre des masses dans le cas de Watts. Une comparaison systématique entre ces deux atlas (Meyer, 1976) a montré des dispersions qui peuvent atteindre localement 0",5 et en moyenne, 0",3. La réduction d'une campagne d'occultations faite avec l'un ou l'autre de ces documents conduit par ailleurs à une même précision de $\pm 0",26$. Remarquons que l'Atlas de Watts est le résultat d'un lissage de 867 profils alors que l'atlas de Weimer est un relevé fidèle de profils tels qu'ils apparaissent sur les plaques photographiques. Leur nombre réduit (139) nécessite une densification qui est en cours (Meyer, 1978) pour permettre une interpolation entre profils compatible avec la précision de l'Atlas. En toute rigueur, pour tirer le maximum de précision de cet Atlas, il faudrait recalculer les librations des clichés utilisés par Weimer à partir des théories modernes de la libration (Migus, 1976 ; Calame, 1975). En effet, une erreur de 3' dans l'orientation du système sélénocentrique peut entraîner des variations du profil apparent de l'ordre de 0",1 et une erreur d'orientation de celui-ci qui peut atteindre 1'.

On a vu que la précision du rattachement des deux systèmes géométrique et dynamique dépend pour une large part de la précision que l'on a sur la topographie lunaire et sur la position du centre des masses par rapport à la surface de la Lune. Par la télémétrie laser, à partir d'un satellite circumlunaire, on peut apporter à la solution de ce problème une amélioration importante. Les missions Apollo 15, 16 et 17 avaient déjà procédé à des mesures altimétriques à l'aide de lasers embarqués. La précision relative sur les dénivellations a été estimée à ± 10 mètres, alors que la précision absolue sur l'altitude du satellite n'a été que de ± 100 mètres après restitution globale de la trajectoire. Les mesures ont été effectuées tous les 30 km, le diamètre du spot au sol étant de 30 mètres environ (Kaula, 1974). Le projet européen POLO (Polar Orbiting Lunar Observatory) de l'ESA doit permettre, par une campagne altimétrique systématique, d'obtenir un gain appréciable sur ces précisions. Ce satellite circulera sur une orbite inclinée de 85° à 95° sur l'équateur lunaire, à une altitude variant de 50 à 150 km (ESA, 1979), ce qui est particulièrement favorable à la description des zones marginales de la Lune. Deux lasers altimétriques pourront être embarqués, l'un fonctionnant en mode déclenché, l'autre en mode continu. Le rôle du premier est d'obtenir des mesures absolues d'altitude servant à caler les mesures de dénivellations relatives réalisées par le second (Gaignebet, 1980). Les spécificités demandées sont : un contrôle d'attitude du satellite à $\pm 5'$ et une restitution d'orbite à ± 10 mètres sur les trois coordonnées spatiales, après modélisation

du potentiel lunaire. Ceci entraîne une erreur possible de $\pm 0^{\circ},005$ sélénocentrique sur la position du point mesuré et de ± 30 mètres sur l'altitude de ce point, compte tenu de ce que les pentes moyennes lunaires ne dépassent pas la dizaine de degré (Evans, 1971). Pour obtenir une bonne couverture des zones marginales, il faudrait 500 orbites. Le long de chacune de ces orbites, le laser continu donne les variations significatives d'altitude du relief entre deux mesures du laser déclenché. Avec la réalisation d'un tel projet, les profils apparents seraient connus avec une précision améliorée d'un facteur 10 par rapport aux atlas actuels.

Après l'examen des différents paramètres qui conditionnent la précision du rattachement entre le système géométrique et le système dynamique, nous pouvons, en regard des techniques d'observation, les rassembler dans le tableau 1, en indiquant l'incertitude qui les affecte présentement et dans le futur.

Tableau 1.

| Techniques d'observation | visuelle | double image | photoélec- trique | futur |
|------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Datation | 0 ^s ,5 500 m | 0 ^s ,1 100 m | 0 ^s ,001 1 m | 0 ^s ,001 1 m |
| Position de la station | 0",005 10 m | 0",005 10 m | 0",005 10 m | 0",001 2 m |
| Positions stellaires | 0",26 520 m | 0",26 520 m | 0",26 520 m | 0",02 40 m |
| Ephémérides | (0",16) 320 m | (0",16) 320 m | (0",16) 320 m | 0",001 2 m |
| Bord lunaire | 0",30 600 m | 0",30 600 m | 0",30 600 m | 0",03 60 m |
| Précision du rattachement | 0",5 1000 m | 0",4 800 m | 0",4 800 m | 0",04 80 m |

3. CONCLUSION

Le rattachement du système dynamique au système géométrique par l'utilisation des observations d'occultations stellaires ne peut se faire aujourd'hui qu'avec une précision médiocre due essentiellement à la mauvaise connaissance de la topographie des zones marginales de la Lune et à la qualité actuelle des catalogues stellaires. On peut attendre un gain d'un facteur 10 sur la précision de ces deux paramètres par la réalisation des projets POLO et HIPPARCOS.

L'observation systématique d'occultations stellaires permettrait alors un rattachement des deux systèmes à $0",04$ près.

REFERENCES

- Baudry, A.: 1979, Radio astrométrie; principe; précision actuelle et future des mesures de positions, Coll. GS V, Bordeaux.
- Calame, O.: 1975, Etude des mouvements libratoires lunaires et localisation des stations terrestres à partir de mesures laser de distances, Thèses, Paris.
- de Vegt, C., Gehlich, U. K.: 1976, *Astron. Astroph.*, 48, p. 245.
- ESA: 1979, HIPPARCOS space astrometry, report on phase A study, *SCI* (79) 10.
- ESA: 1979, Polar orbiting lunar observatory, assessment study, *SCI* (79) 7.
- Evans, D. S.: 1971, in proceedings of the IAU General Assembly, *Highlights of Astronomy*, C. de Jager ed., p. 601.
- Gaignebet, J.: 1980, Communication personnelle.
- Kaula, W. M., Schubert, G., Lingenfelder, R. E., Sjogren, W. L., Wollenhaupt, W. R.: 1974, *Proc. Fifth Lunar Conf.*, 3, p. 3049.
- Klock, B. L., Scott, D. K.: 1970, *Astr. J.*, 75, p. 851.
- Kovalevsky, J.: 1975, in *Space Astrometry*, ESR0, SP 108, p. 67.
- Kovalevsky, J.: 1979, *IAU Symposium No. 82*, p. 151.
- Meyer, C.: 1974, Contribution à la détermination des positions lunaires par l'observation d'occultations au moyen d'un micromètre à double image, Thèses, Paris.
- Meyer, C.: 1976, *The Moon*, 16, p. 27.
- Meyer, F.: 1978, Méthode pour l'amélioration et l'extension d'un catalogue de profils lunaires, Thèses, Nice.
- Migus, A.: 1976, *The Moon*, 15, p. 165.
- Morrison, L. V.: 1971, *Proc. IAU Symposium No. 47*, p. 395.
- Morrison, L. V.: 1979, *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, 187, p. 41.
- Nather, R. E., Evans, D. S.: 1970, *Astr. J.*, 75, p. 575 and p. 953.
- Slade, M. A., Preston, R. A., Harris, A. W., Skjerve, L. J., and Spitzmesser, D. J.: 1977, *The Moon*, 17, p. 133.
- Valein, J. L.: 1979, Etude de la rotation de la Terre à partir des mesures laser-Lune, Thèses, Paris.
- Watts, C. B.: 1963, *Astr. Pap. Washington*, 17.
- Weimer, T.: 1952, *Atlas de profils lunaires*, Observatoire de Paris.
- Weimer, T.: 1954, *Recherches sélénographiques: allongement du sélénoïde, libration physique, profils lunaires*, Thèses, Paris.
- Yasuda, H., Miyauchi, N.: 1971, *Ann. Tokyo Astr. Obs.*, 12, p. 188.