ASTROMÉTRIE DE HAUTE PRÉCISION, DYNAMIQUE ET PLANÉTOLOGIE

P. Descamps

1. Introduction

Le but de cet article est de montrer en quoi la recherche de la très haute précision dans l'astrométrie des satellites de planètes est d'une importance capitale dans la compréhension de certains phénomènes dynamiques et physiques en jeu parmi ces corps.

Les principales méthodes d'observation des positions des satellites de planètes sont les observations d'éclipses par la planète, les observations photographiques, les observations CCD et les observations de phénomènes mutuels. Les techniques les plus couramment utilisées (photo et CCD) ne permettent au mieux qu'une précision comprise entre 0.03 et 0.1 seconde d'arc.

Le seul type d'observation qui peut réellement permettre d'atteindre des précisions astrométriques de l'ordre du millième de seconde d'arc (1 mas) sont les phénomènes mutuels des systèmes de satellites. En effet, lors de ces phénomènes, la vitesse relative des satellites s'occultant ou s'éclipsant est de l'ordre de 20km/s. C'est-à-dire qu'avec un échantillonnage en temps de 1/10ème de seconde, il est théoriquement possible d'atteindre une précision de quelques kilomètres. Pour cela, il est bien sur tout à fait nécessaire de disposer de très bonnes observations mais également d'un très bon modèle des effets photométriques de surface (Descamps, 1992). À ce niveau de précision, il convient dès lors de quantifier certains effets astrométriques faibles jusqu'ici non pris en considération.

2. Évaluation des effets astrométriques faibles

Deux effets astrométriques faibles ne sont pas pris en compte dans la réduction actuelle des courbes de lumière de phénomènes mutuels: l'effet de parallaxe et la déviation relativiste des rayons lumineux nous provenant des satellites galiléens due à Jupiter.

2.1. Effet de la parallaxe horizontale

Actuellement, on considère que la réduction des observations se fait dans un référentiel géocentrique, c'est-à-dire que l'on ne tient pas compte de la position de l'observateur à la surface de la Terre. De ce fait, on commet donc une certaine erreur dont la valeur maximale peut être calculée comme indiqué sur la figure 1 à l'aide de la relation suivante:

$$\frac{\omega}{\alpha} = \frac{d}{\delta} \Longrightarrow \omega \leq 9 \text{ mas}$$

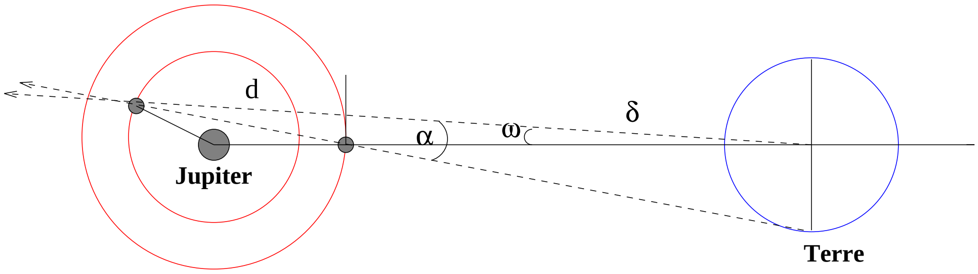

FIG. 1 - *Effet de la parallaxe horizontale*

2.2. Déviation relativiste de la lumière

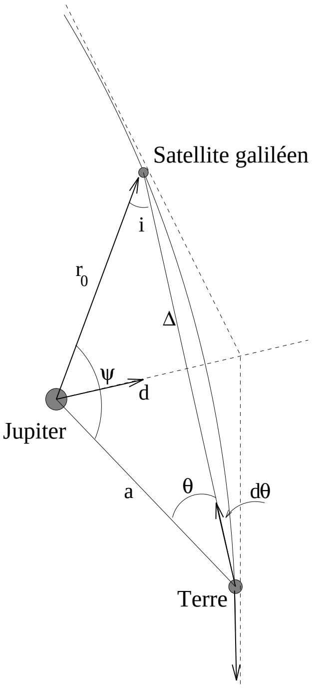

Figure 1bis: *Déviation relativiste*

Un autre effet faible tient à la déviation relativiste de la lumière due à Jupiter. Elle peut être calculée à l'aide de la relation obtenue par D.Hestroffer (1994) dans sa thèse dans le cas d'un corps situé à une distance finie.

$$d\theta = 2\frac{m}{a}\frac{sin\psi}{(1 + cos\psi)}$$

Dans cette relation, m est le rayon relativiste de Jupiter (soit 1.4m), a est la distance Terre-Jupiter, et Ψ l'angle entre les directions Jupiter-Terre et Jupiter-satellite ainsi qu'il est indiqué sur la figure 1bis. En se placant dans le cas le plus favorable, c'est-à-dire pour Callisto, satellite galiléen situé le plus loin de Jupiter, et dans le cas où sa lumière vient tangenter le limbe de Jupiter ($r_0 = 26.3R_{Jup}, \Psi = 178^0$). Dans ce cas, la déviation maximale obtenue est très faible, elle est de l'ordre du rayon relativiste de la planète:

$$\Longrightarrow d\theta \leq 0.06 \text{ mas}$$

Seul, dans la perspective d'une précision astrométrique de l'ordre du mas, l'effet de parallaxe mérite d'être retenu lors de la réduction des observations de courbes de lumière de phénomènes mutuels. Cet effet n'est de plus sensible que dans le cas des satellites galiléens de Jupiter qui sont relativement plus proche de la Terre que les satellites des autres grosses planètes telles que Saturne ou Uranus.

3. Astrométrie de haute précision et dynamique

3.1. Évolution orbitale

Les systèmes de satellites des grosses planètes présentent entre-eux de nombreuses résonances et quasi-résonances. Ces résonances alliées aux intenses effets de marées induits par la planète mère créent alors une excentricité forcée dans les orbites de ces satellites. C'est notablement le cas des satellites galiléens Io et Europe et des satellites de Saturne Mimas et Encelade. Cette excentricité forcée va alors engendrer une micro accélération séculaire du satellite sur sa trajectoire et donc un décalage en longitude qui, au bout d'un certain temps t s'exprime par:

$$\Delta l = 0.5(\frac{dn}{dt})t^2$$

où $\frac{dn}{dt}$ est l'accélération séculaire du satellite.

Une telle accélération a, jusqu'à présent, été mesurée pour seulement deux satellites par l'ajustement d'un terme en t^2 dans les modèles dynamiques: Io et Mimas. Les décalages alors induits sur la durée pour laquelle on dispose d'observations de ces satellites sont:

Io: 180 km/ 300 ans (Lieske, 1987)
Mimas: 330 km/ 100 ans (Dourneau, 1987)
Mimas: $\leq$ 100 km/ 100ans (Sarlat, 1992)

Le décalage en longitude pour Io correspond à 0.07 arcsec, c'est-à-dire que l'on est à la limite de la précision des observations qu'a utilisé Lieske pour sa détermination. En conséquence si on dispose d'observations de très haute précision, on pourra alors procéder à l'ajustement d'un terme séculaire sur une durée plus courte, évitant ainsi les problèmes liés aux observations anciennes.

En ce qui concerne la supposée accélération de Mimas, Duriez et Vienne (1991) montrèrent à travers leur nouvelle théorie que cette accélération provenait tout simplement de l'absence de certains termes à longue période dans les précédents modèles dynamiques. L'ajustement d'une parabole sur les séries de termes à longue période nouvellement introduits et représentant la longitude moyenne permis de retrouver la valeur de l'accélération de Dourneau. De plus Sarlat (1992) vint confirmer ce résultat en donnant une borne supérieure, bien inférieure à la valeur de Dourneau, à l'accélération de Mimas à partir de considérations sur le taux de dissipation minimum possible dans l'intérieur de Saturne.

En fait ces déterminations doivent être remises en causes car elles sont basées sur l'ajustement de modèles dynamiques dans lesquels les effets relativistes ne sont pas considérés.

3.2 Effets dynamiques relativistes

Aux difficultés inhérentes à la détermination de l'accélération séculaire vient s'ajouter un effet linéaire relativiste à long terme provenant de l'avance du péricentre. Cette avance du péricentre sur une période orbitale est donnée par la formule approchée classique:

$$\delta\tilde{\omega} = 6\pi(\frac{m}{a})$$

où a est le demi-grand axe de l'orbite du satellite et m le rayon relativiste de la planète mère donné par $m = GM/c^2$. Ainsi, pour Jupiter, dont le rayon relativiste est de 1.4m, on a une avance du périjove de Io de 5.2km/an et pour Saturne dont le rayon relativiste est de 0.42m, l'avance du pericentre de Mimas atteint 3.1km/an. Si l'on compare cet effet, sur des intervalles de temps semblables aux durées pour lesquelles on dispose d'observations, à l'effet engendré par l'existence d'une accélération du moyen mouvement, on constate qu'ils peuvent être du même ordre de grandeur voire bien supérieurs pour l'avance relativiste du péricentre.

Or les modèles dynamiques actuels ne prennent pas encore en compte les corrections relativistes considérées comme négligeables devant la précision des observations.

4. Astrométrie de haute précision et planétologie

4.1. Évolution orbitale et géophysique des satellites

L'existence d'accélérations séculaires a pour conséquence physique directe d'induire une dissipation d'énergie plus ou moins importante à l'intérieur des corps. La manifestation la plus spectaculaire de ceci est la formidable activité volcanique de Io. De manière générale, les corps présentant une accélération en moyen mouvement substantielle présenteront également en surface des traces physique de ces formidables énergies dissipées en leur sein.

Mimas, jadis soupçonné d'avoir une accélération séculaire importante présente en fait une surface fortement cratérisée (figure 2) n'ayant donc subie aucune modification depuis sa formation. Ceci est donc la marque d'une absence totale de toute source interne d'énergie. À l'inverse, Encelade, qui est en résonnance 1:2 avec Dione, révèle une surface contrastée avec de nombreux terrains très jeunes, marque d'un volcanisme d'eau peut-être encore actif. Certains faits permettent de le penser, notamment la forte densité de matière présente tout le long de l'orbite d'Encelade évoluant au sein de l'anneau E. Des calculs montrent que la durée de vie de ces particules est inférieure à 100000 ans. Il est donc nécessaire qu'un mécanisme de régénérescence existe. Il pourrait être alors lié à la production de matière en provenance d'Encelade.

La connaissance des accélérations séculaires qui permet aussi d'avoir accès à l'évolution des résonnances est donc un élément important de la compréhension de la physique des corps. Elle permettrait aussi de trancher entre les différents types d'évolution qui sont proposés pour interpréter le volcanisme de Io. C'est-à-dire, sommes-nous en présence d'une évolution monotone hors de la résonnance avec Europe tendant donc vers une extinction de toute activité volcanique sur Io ou plutôt avons-nous affaire à un volcanisme épisodique?

FIG. 2 - *Images Voyager de Mimas et d'Encelade*

4.2. Détermination des paramètres de surface

Ainsi que cela a été déjà dit en introduction, l'obtention de la pleine précision astrométrique d'une observation de phénomène mutuel nécessite une modélisation aussi précise que possible des effets locaux et globaux de la diffusion de la lumière solaire par les surfaces des corps. En particulier, ceci se fait à l'aide de paramètres dit "de surface" qui renvoient aux propriétés physiques des couches superficielles concernées (albédo, porosité, rugosité, type et forme des particules du régolithe...).

Dans le cas des satellites galiléens, nombre de ces paramètres étaient déjà connus à partir d'observations terrestres et d'observations "in situ" réparties sur une large gamme d'angles de phase. Cependant, la méthode basée sur l'ajustement de ces paramètres aux observations de phénomènes mutuels a prouvé sa capacité non seulement à déterminer certains de ces paramètres mais aussi s'est révélée être la seule méthode terrestre à être capable de mesurer la rugosité macroscopique des surfaces sans l'aide d'observations à grand angle de phase (rappelons que, depuis la Terre, l'angle de phase maximum pour Jupiter est de 11^o).

Ceci va se révéler particulièrement intéressant dans le cas des satellites de Saturne qui présenteront eux aussi des phénomènes mutuels en 1995 (Thuillot, 1994 et Arlot, 1994) et pour lesquels relativement peu de paramètres de surface sont connus du fait d'un survol limité de ces satellites par les sondes spatiales Voyager.

4.3. Volcans de Io

Un autre apport important de l'astrométrie à la planétologie concerne l'étude et le suivi temporel des volcans de Io. Ces volcans, qui sont à l'échelle du satellite des sources ponctuelles chaudes, représentent l'essentiel de l'émission infrarouge de Io. Il est donc tout à fait judicieux de chercher à observer les occultations de Io par d'autres satellites galiléens dans les bandes de l'infrarouge proche. Ce type d'observation permet alors de détecter et de localiser les volcans actifs mais également d'en donner leurs caractéristiques physiques (température, dimensions, carte tomographique).

La figure 3 représente l'observation infrarouge de l'occultation de Io par Europe du 6 mars 1991 faite par Spencer et al. (1994) ainsi que la configuration géométrique correspondante (le mouvement s'effectue de l'est vers l'ouest). En dessous sont tracées les courbes modèles obtenues pour différentes valeurs du paramètre d'impact, c'est-à-dire de la distance Io-Europe, et sur la base d'une modélisation des paramètres physiques des volcans visibles à ce moment, obtenus à partir d'une observation antérieure (Descamps et al., 1992). La courbe en traits pleins correspond à la configuration géométrique théorique prédite à partir de l'éphéméride G5 où le volcan Loki apparaît en occultation rasante. L'observation ne montre aucune variation brusque en flux correspondant à la disparition de Loki derrière le disque d'Europe. Par contre, l'occultation d'un autre volcan connu sous le nom de Pelé est nettement visible. Ceci nous indique immédiatement que le paramètre d'impact réel est beaucoup plus grand que celui prédit. Ce type d'observation permet donc de réaliser une astrométrie de haute précision.

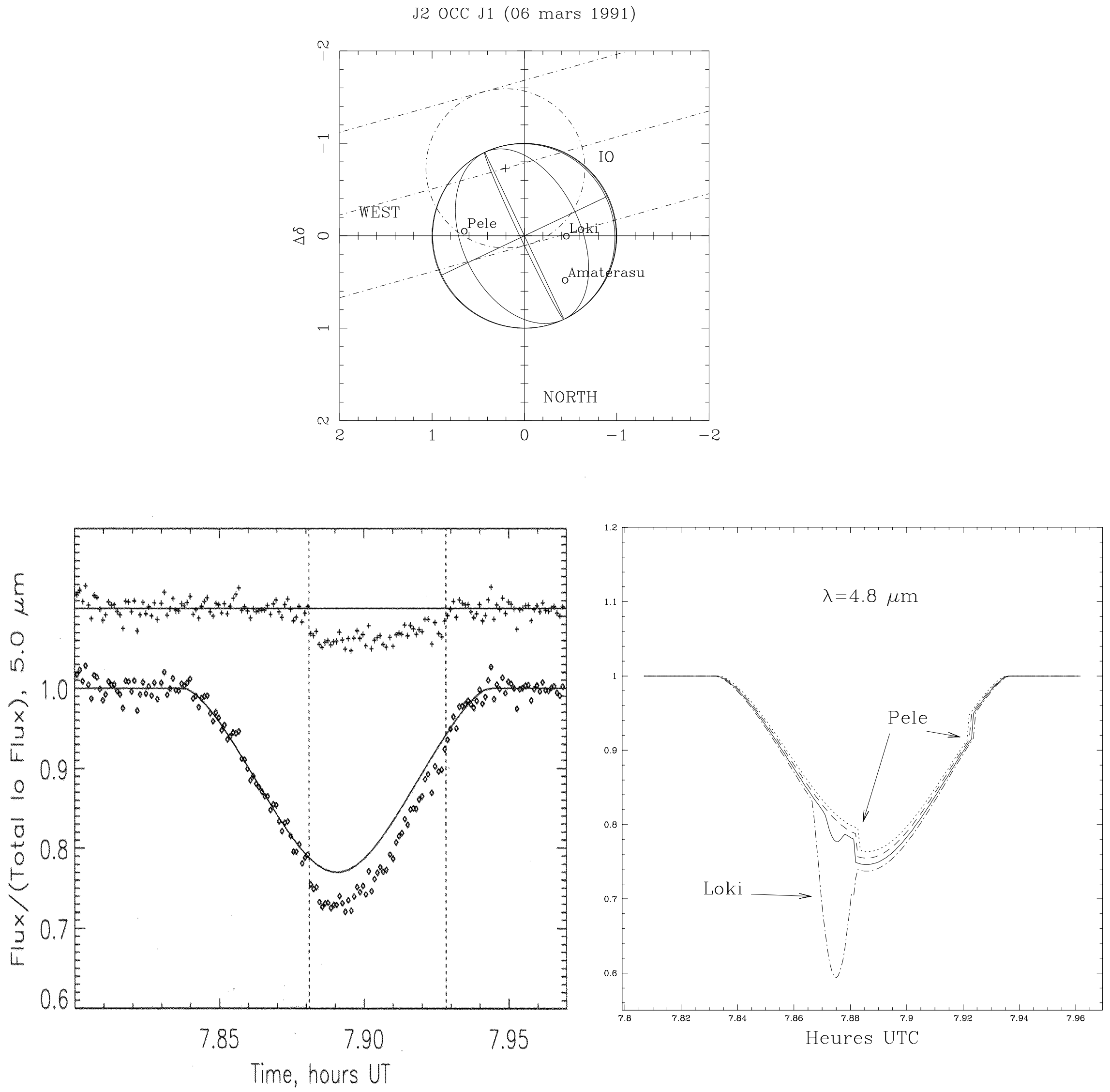

FIG. 3 - Occultation de Io par Europe le 06 mars 1991. Les différentes courbes modèles sont obtenues pour des paramètres d'impact variant de 50km d'une courbe à l'autre. La configuration géométrique du phénomène est présentée à l'instant du minimum de distance. Europe et sa trajectoire relative sont en traits pointillés.

5. Conclusion

Tant dans la connaissance de la dynamique des satellites naturels que dans la connaissance de leur physique (volcans de Io, chauffage d'Encelade, ...), il apparaît que la recherche de la très haute précision dans l'astrométrie de ces corps revêt une importance capitale. Actuellement, les meilleures observations astrométriques, hors phénomènes mutuels, permettent des précisions de l'ordre du 0.01 arcsec. Il s'agit en fait de gagner un facteur 10 en précision et l'observation des phénomènes mutuels permet ceci. Cependant, cette amélioration n'est possible que si l'on dispose d'une modélisation adéquate de la diffusion de la lumière solaire par les surfaces des satellites. Du point de vue pratique, cela exige aussi que la résolution en temps des mesures photométriques soit comprise entre 0.1 et 1s et que la chute en magnitude observée soit parfaitement calibrée à 0.1 magnitude près.

Références

Arlot, J.-E.: 1994, *Organisation de la campagne PHESAT95 d'observation des phénomènes des satellites de Saturne.* Journées scientifiques du Bureau des longitudes 1994.

Descamps, P.: 1992, *Les effets de surface dans la réduction des observations de phénomènes mutuels des satellites de planètes.* Journées scientifiques du Bureau des longitudes 1992, 37-42.

Descamps, P., Arlot, J.-E. and Thuillot, W.: 1992, Observation of the volcanoes of Io, Loki and Pele, made in 1991 at ESO during an occultation by Europa *Icarus*, **100**, 235-244.

Dourneau, G.: 1987, *Observations et Études du mouvement des huits premiers satellites de Saturne.* PhD thesis, Université de Bordeaux.

Duriez, L. and Vienne, A.: 1991, A general theory of motion for the eight major satellites of Saturn I: Equations and method of resolution. *Astron. Astrophys.*, **243**, 263-275.

Hestroffer, D.: 1994, *Astrométrie et photométrie des astéroïdes observés par Hipparcos. Apport à l'élaboration d'un système de référence dynamique* PhD thesis, Observatoire de Paris.

Lieske, J.H.: 1987, Galilean satellite evolution: Observational evidence for secular change in the mean motion. *Astron. Astrophys.* , **176**, 146-158.

Sarlat, J.M.: 1992, *Perturbation des éléments orbitaux d'un satellite sous l'effet des marées.* Stage de DEA, Observatoire de Paris.

Spencer, J.R., Clark B.E., Woodney L.M., Sinton W.M. and Toomey D.: 1994, Io hot spots in 1991: Results form Europa Occultation photometry and infrared imaging *Icarus*, **107**, 195-208.

Thuillot, W. 1994. Campagne PHESAT95: Les prédictions des phénomènes des satellites de Saturne Journées scientifiques du Bureau des longitudes 1994.

LES PRÉDICTIONS D'OCCULTATIONS ET DE RAPPROCHEMENTS D'ÉTOILES

J. Berthier

1. Intérêt des observations d'occultations d'étoiles

Les observations du mouvement apparent des planètes et des astéroïdes relativement à un champ d'étoiles possèdent de nombreuses applications telles que la détermination des erreurs systématiques des catalogues (en positions) et de leur système de référence associé (positions de l'équinoxe et de l'équateur), la construction d'un système de référence dynamique (basé sur le mouvement des astéroïdes par exemple), ou la comparaison directe entre systèmes de référence (dynamique, extragalactique, ...). De plus, ces observations sont d'une très grande précision astrométrique (quelques $0.01''$ de degrès), et fournissent des renseignements d'ordre planétologique uniques, tels que la structure, la forme, la dimension ou l'environnement de l'astéroïde, données inaccessibles par l'observation directe.
Malheureusement, il existe certaines limites restreignant actuellement l'exploitation complète de ce type d'observations. En effet, la magnitude faible des astéroïdes (souvent supérieure à 11) impose leur observation à l'opposition et implique une corrélation importante entre les paramètres mesurés. La distribution limitée des astéroïdes à une bande proche de l'écliptique (environ $\pm$ 30 degrès) ne permet qu'une faible couverture de la sphère céleste et le faible nombre d'observations implique l'utilisation de vieilles observations souvent peu précises. Enfin, l'imprécision actuelle des prédictions d'occultations limite considérablement la réalisation de ce type d'observation.

2. État actuel des observations et prédictions d'occultations

2.1. Les observations
A l'heure actuel, un faible nombre des observations réalisées présente une occultation : on assiste plus généralement à un passage rapproché entre l'astéroïde et l'étoile, ce qui n'est pas une perte en soi puisque

la réduction astrométrique d'un tel phénomène peut apporter une amélioration de la connaissance de l'orbite de l'astéroïde (ou de la position de l'étoile). Ce nombre d'observations est faible car le nombre de phénomènes observables (c'est à dire lorsque la bande de visibilité du phénomène passe par un observatoire) est petit (une dizaine par mois répartis sur le globe terrestre), auquel vient s'ajouter l'imprécision des prédictions et parfois le découragement des observateurs. De plus, une exploitation complète des observations d'occultations nécessite des observations multiples (en différents lieux sur la bande de visibilité) d'un même phénomène. De ce fait, il est important que ces observations se fassent dans un cadre international. Pour cela, il existe actuellement deux associations coordonnant et regroupant les observations d'occultations sur un plan international. Il s'agit de l'association EAON (European Asteroidale Occultation Network) dirigé par E. Goffin, qui assure la couverture européenne des observations, et de l'association IOTA (International Occultation Timing Association) dirigée par D.W. Dunham, qui assure la couverture pour le reste du monde.

2.2. Les prédictions

Jusqu'à présent, les prédictions d'occultations sont calculées et diffusées par les deux organismes cités précédemment. Ils proposent les phénomènes majeurs annuels, sélectionnés par divers critères (visibilité, importance de l'astéroïde) et concernant des étoiles tirées de divers catalogue (PPM, GSC, DM, Lick). Leur précision est de $720 * \rho$ km, avec ρ la distance géocentrique en UA de l'astéroïde.
Je suis maintenant en mesure de fournir des prédictions d'occultations, mettant en jeux les astéroïdes de la ceinture principale, les planètes, les satellites naturels de Jupiter et Saturne et les étoiles du PPM et du HIC (Hipparcos Input Catalog). Ces prédictions sont comparables à celles fournies par EAON et IOTA, mais présentent des différences systématiques allant de quelques secondes à 10 ou 15 minutes sur l'instant du minimum de distance, soit inférieures à une seconde de degrès en position. Ces différences proviennent des écarts entre les sources utilisées dans les calculs d'éphémérides et des modèles utilisés. Une estimation de la précision sur le calcul de la ligne de centralité est $600 * \rho$ km, avec ρ en UA.

3. Amélioration des prédictions

Cette précision est conditionnée par la précision des éphémérides des astéroïdes ($\leq 0.5''$) et des étoiles ($\leq 0.3''$ pour le PPM), et par des erreurs numériques d'arrondis du modèle développé (considérées comme négligeables). Il est donc nécessaire pour améliorer les prédictions d'obtenir avec une plus grande précision des éphémérides des astéroïdes (planètes, satellites) et des étoiles. Pour cela, il existe deux solutions. La première consiste à accroître la précision des éléments osculateurs des astéroïdes par le biais d'observations (corrections des conditions initiales par interpolation/extrapolation à partir des observations) ainsi que d'accroître la précision des positions et vitesses des étoiles sur la sphère céleste. Mais ceci exige des années d'observations et ne peut être réalisé à courte échéance. La deuxième solution consiste à réaliser juste avant un phénomène (quelques jours à un mois) des observations dites de *dernière minute*. Cela permet d'améliorer les positions relatives de l'astéroïde et de l'étoile, d'une manière locale, et le calcul de nouvelles prédictions plus précises. En revanche, cette méthode nécessite des moyens humains (pour observer) et en matériel (méridienne, télescope à grand champ) important, et ne peut se concevoir que dans le cadre d'une collaboration internationale. C'est ce que proposent déjà les organisations EAON et IOTA, en coordonnant des observations dites de *dernière minute* pour l'amélioration des prédictions de phénomènes futurs.

4. Applications pratiques

Au-delà du caractère spécialisé des occultations d'étoiles par les astéroïdes, il existe une demande sans cesse croissante de prédictions de phénomènes du même type mettant en jeu d'autre corps célestes, ou dans une optique différente. C'est le cas du projet SAX (mission spatiale italienne d'observation en

rayon X) ; le Bureau des longitudes a été sollicité pour calculer une table "d'obscuration", contenant les rapprochements de corps du système solaire (planètes, satellites, astéroïdes et comètes) avec les étoiles du catalogue SAX (établi par le CDS pour les besoins de la mission) pour la période 1996–1999. C'est le cas de l'occultation de la source infra-rouge T-Tauri par la Lune du 16 déc. 94, pour laquelle j'ai été amené à calculer les conditions astrométriques d'observation au CFH du phénomène (dates d'immersion et d'emmersion de l'étoile).
Ainsi, face à cette demande, et face à l'impact capital des astéroïdes dans le perfectionnement de la connaissance scientifique de notre système solaire, il est nécessaire de continuer l'effort de développement de l'observation des astéroïdes (astrométrie, photométrie), et de poursuivre la mise en place des programmes d'observations dites de dernière minute pour l'amélioration des prédictions de phénomènes.

Références

Berthier, J.: 1992, Rapprochements et occultations entre étoiles et astéroïdes. *Notes Scientifiques et techniques du Bureau des longitudes* **S038**, 1992.

Duncombe, R.L., Hemenway, P.D.: A comparison of astrometric measurement techniques as applied to minor planets. *Celestial Mechanics* **26**, 1982.

Orelskaya, V.I.: On the improvement of star positions from minor planet observations. *Asteroids, comets and meteoric matter, IAU Colloquium no* **22**, 1974.

Podobed, V.V.: Fundamental astrometry. *The University of Chicago Press*, 1965.