

ISSN 1243-4272
ISBN 2-910015-21-1

*NOTES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES
DU BUREAU DES LONGITUDES*

S061

Serveur d'éphémérides du Bureau des longitudes

- Volume 2 -

Définitions relatives aux éphémérides
pour l'observation physique
des corps du système solaire

J. Berthier



*Service des calculs et de mécanique céleste du Bureau des longitudes
URA 707
77, avenue Denfert-Rochereau
F-75014 Paris*

Juin 1998

Table des matières

1	Introduction	3
2	Définitions	3
2.1	Systèmes de rotation	3
2.1.1	Définitions	3
2.1.2	Cas des planètes et de la Lune	5
2.1.3	Cas des astéroïdes	6
2.2	Point sub-terrestre SEP	7
2.3	Point sub-solaire SSP	9
2.4	Angle de position du pôle nord	9
2.5	Aspect visuel – magnitude	9
2.5.1	Angle de phase	10
2.5.2	Magnitude visuelle	11
2.5.3	Rayon apparent	15
2.5.4	Equateur d'intensité	16
3	Calcul des éphémérides	17
3.1	Sources des éphémérides	17
3.2	Mise en œuvre	17
3.2.1	Cas géocentrique	18
3.2.2	Cas des sondes spatiales	19
3.2.3	Remarques	19
4	Représentation graphique	20
4.1	Modèles géométriques	20
4.2	Modèles topographiques	22

1 Introduction

Le propos des éphémérides pour l’observation physique des corps du système solaire est de fournir un ensemble de paramètres caractérisant l’aspect visuel des corps, tels qu’ils sont observés depuis la Terre, ou plus généralement depuis un autre corps du système solaire ou depuis une sonde spatiale. Ces paramètres se distinguent en deux catégories : ceux qui décrivent la position de la planète par rapport à la position de l’observateur dans le système solaire et ceux qui décrivent ses caractéristiques photométriques dans les longueurs d’onde du visible et du proche infra-rouge.

L’objectif de cette note est de fournir les définitions et les bases de calcul utiles à la construction des éphémérides pour l’observation physique des corps du système solaire proposées sur le serveur d’éphémérides du Bureau des longitudes (<http://www.bdl.fr/ephemeride.html>). Le sujet traité abordera les définitions des systèmes de rotation des corps du système solaire ainsi que la description des paramètres caractérisant l’aspect apparent de ces corps. Les calculs d’éphémérides de position des corps célestes nécessaires dans ces calculs ne seront pas traités ici. Pour cela on se reportera au document *Définitions relatives aux éphémérides de position des corps célestes* [Ber98]. L’étude des éphémérides pour l’observation physique des corps du système solaire pourra être complétée en consultant [DAB⁺96], [Bdl97] et [Sei92].

2 Définitions

Pour observer la surface d’un corps du système solaire (planète, satellite naturel, astéroïde ou comète) il est nécessaire de déterminer, à l’instant de l’observation, certaines quantités liées à sa rotation ainsi qu’à son apparence physique afin de savoir quels sont les points de l’astre visibles depuis l’observateur à l’instant considéré. Pour cela, les paramètres généralement calculés sont, historiquement, les coordonnées planétocentriques ou planétographiques de la Terre et du Soleil (connues aussi sous les noms de point sub-terrestre - SEP - et de point subsolaire - SSP -), l’angle de position de la direction du pôle nord de l’astre par rapport à celle du pôle céleste nord, et certaines quantités décrivant l’aspect du corps (magnitude, phase, rayon apparent, équateur d’intensité, etc.). Avec l’avènement de l’exploration spatiale et les besoins qui en résultent nous étendrons la notion de point sub-terrestre à celle plus générale de point sub-observateur. L’un ou l’autre de ces termes seront employés sans distinction par la suite.

2.1 Systèmes de rotation

2.1.1 Définitions

Les paramètres de rotation permettant de décrire l’orientation dans le temps et l’espace des corps du système solaire sont exprimés dans les systèmes de rotation standard [DAB⁺96]. Les axes de rotation des corps sont connus à chaque instant par la donnée en fonction du temps de l’ascension droite α_0 et de la déclinaison δ_0 dans le système J2000 (*i.e* équateur moyen J2000 ; équinoxe J2000) de la direction de leurs pôles nord (voir fig. 1). Par définition, le pôle nord d’un corps est celui des deux pôles de l’axe de rotation qui se trouve au nord du plan invariant du système

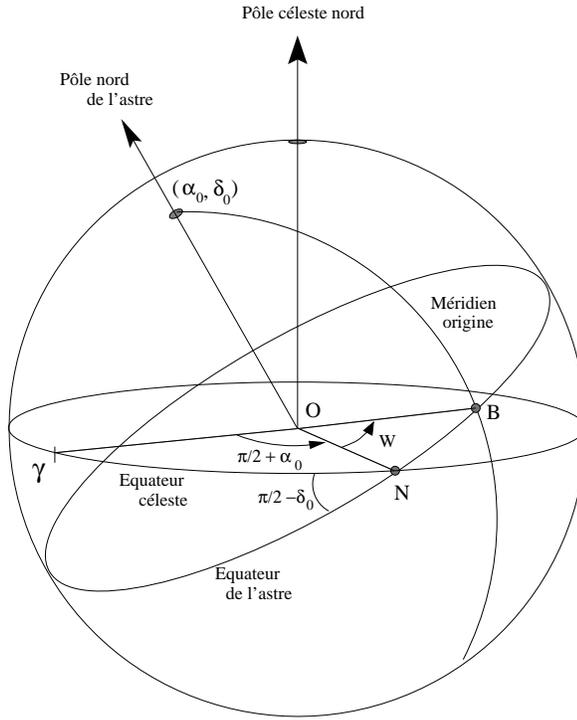


FIG. 1 – Définition des éléments de la rotation des corps du système solaire.

solaire¹ et ceci quelque soit le sens de la rotation sidérale du corps². En l'absence d'autres informations on suppose que l'axe de rotation du corps est perpendiculaire à son plan orbital moyen (cas de Mercure et de la plupart des satellites naturels).

Le mouvement de rotation des corps est défini à chaque instant par la donnée en fonction du temps de l'angle $W = \widehat{\mathbf{NB}}$ compté le long de l'équateur du corps et calculé par l'expression :

$$W = W_0 + W_1 T \quad (1)$$

W_0 est l'angle entre un méridien origine et le demi grand cercle passant par le pôle nord du corps et le point d'intersection entre l'équateur du corps et l'équateur céleste à l'époque J2000 (point N). W_1 représente la vitesse angulaire de rotation du corps et son signe informe du sens de la rotation : positif, il indique un mouvement de rotation prograde, négatif, il indique un mouvement de rotation rétrograde. T représente l'intervalle de temps entre l'époque de l'observation et une époque de référence (J2000 par exemple).

On trouvera les valeurs numériques des paramètres α_0 , δ_0 , W_0 et W_1 pour tous les corps pour lesquels ils sont connus en consultant [DAB⁺96] ou [Bdl97] et [Mag95].

1. On peut définir un plan invariant du système solaire en choisissant le plan perpendiculaire au moment cinétique du barycentre du système solaire. L'inclinaison de ce plan par rapport à l'écliptique J2000 est environ $1^{\circ}.58$. Les coordonnées de son pôle sont $\alpha_0 = 273^{\circ}.85$, $\delta_0 = 66^{\circ}.99$.

2. On peut aussi définir le pôle nord d'un corps en choisissant celui des deux pôles pour lequel la rotation est prograde.

2.1.2 Cas des planètes et de la Lune

Pour les planètes telluriques, le mouvement de rotation est défini comme étant la rotation de l'écorce de l'astre, avec pour méridien origine un méridien défini comme suit :

- Mercure : le méridien origine est défini tel que le méridien de longitude 20° passe par le centre du cratère Hun Kal.
- Vénus : le méridien origine est défini tel qu'il passe par le pic central du cratère Ariadne.
- Mars : le méridien origine est défini tel qu'il passe par le centre du cratère Airy-O.

Pour la Lune, les coordonnées planétocentriques (ou sélénocentriques) et plannétographiques (ou sélénographiques) de la Terre doivent prendre en compte les oscillations périodiques ou librations de la surface lunaire vue depuis la Terre. La libration de la Lune est composée de :

- la libration physique : oscillations de la vitesse angulaire instantanée de rotation de la Lune par rapport à sa vitesse moyenne de rotation
- la libration optique :
 - libration en longitude due aux variations de la vitesse orbitale de la Lune
 - libration en latitude due à l'inclinaison de l'équateur de la Lune sur le plan de son orbite
 - libration diurne due au déplacement de l'observateur terrestre provenant de la rotation de la Terre elle-même

La combinaison de ces deux effets permet de découvrir jusqu'à 59% de la surface lunaire vue depuis la Terre. La libration optique est la composante la plus importante. Elle procure un décalage des points de la surface lunaire par rapport au centre du disque apparent pouvant atteindre $7^\circ 57'$ en longitude et $6^\circ 51'$ en latitude. La libration physique est un effet beaucoup plus faible, puisqu'elle procure un décalage maximum de 0.04° en longitude et latitude. Lorsque la libration en longitude sélénocentrique (sélénographique) de la Terre est positive, le centre moyen du disque lunaire est décalé vers l'est sur la sphère céleste, exposant à notre vue des régions du limbe ouest. Lorsque la libration en latitude sélénocentrique (sélénographique) de la Terre est positive, le centre moyen du disque est décalé vers le sud, exposant à notre vue les régions du limbe nord. Une étude plus détaillée de la libration de la Lune ainsi que le calcul de ses différentes composantes pourront être obtenus en consultant [Kop66]. Pour des observations précises du disque lunaire, les valeurs géocentriques de la libration et de l'angle de position du pôle nord devront être corrigées de la parallaxe horizontale topocentrique de la Lune pour former la libration topocentrique. Cet effet, pouvant atteindre 1° , pourra être calculé par corrections différentielles, données par les relations :

$$\Delta\lambda_E = \frac{-\pi' \sin(Q - PAN)}{\cos\beta_E}$$

$$\Delta\beta_E = +\pi' \cos(Q - PAN)$$

$$\Delta PAN = \Delta\lambda_E \sin(\beta_E + \Delta\beta_E) - \pi' \sin Q \tan \delta$$

où Q est l'angle parallactique de la Lune, π' sa parallaxe topocentrique horizontale et δ sa déclinaison géocentrique, définis par :

$$\tan Q = \frac{\cos \Phi \sin H}{\cos \delta \sin \Phi - \sin \delta \cos \Phi \cos H}$$

$$\cos z = \sin \delta \sin \Phi + \cos \delta \cos \Phi \cos H$$

$$\sin \pi' = \frac{\sin z \sin \pi}{1 - \sin z \sin \pi}$$

z représentant l'angle au zénith de la Lune, π la parallaxe géocentrique de la Lune, H l'angle horaire local et Φ la latitude de l'observateur. La position sélénocentrique (sélénographique) du Soleil est quant à elle représentée par sa colongitude et sa latitude. La colongitude est obtenue en augmentant la longitude sélénocentrique (sélénographique) du Soleil de 90° . Ainsi, les valeurs 270° , 0° , 90° et 360° de la colongitude du Soleil correspondent approximativement à la nouvelle Lune, premier quartier, pleine lune et dernier quartier.

Pour les planètes géantes, il existe plusieurs systèmes de mesures de longitude, chacun correspondant à différentes vitesses angulaires de rotation de l'astre. Ainsi, sur Jupiter, on distingue 3 systèmes usuellement dénommés systèmes I, II et III. Le premier est défini à partir de la rotation moyenne de l'atmosphère équatoriale de la planète. Le système II est défini à partir de la rotation moyenne des atmosphères nord (composante sud de la bande équatoriale nord) et sud (composante nord de la bande équatoriale sud) de Jupiter. Enfin, le système III est défini à partir de la rotation du champ magnétique de la planète. Sur Saturne, seuls les systèmes I et III sont définis. Cependant, le système I étant trop mal déterminé, il n'est pas recommandé par l'UAI et n'est pas pris pour référence lors des calculs. De la même manière, pour Uranus et Neptune, seuls les calculs se rapportant au système III sont à envisager. Pour Pluton, le méridien origine est défini comme étant le méridien sous Charon.

2.1.3 Cas des astéroïdes

Il est d'usage d'exprimer les coordonnées des pôles des astéroïdes dans un repère écliptique moyen dont l'équinoxe est l'équinoxe B1950 ou J2000. Dans ce cas il est nécessaire de transformer ces coordonnées pour les exprimer dans le repère standard des systèmes de rotation des planètes à savoir un repère équatorial à l'époque J2000 (FK5, ICRF). Si le repère initial est l'écliptique moyen – équinoxe 1950, on commencera par exprimer les coordonnées du pôle dans un repère équatorial comme le repère de référence FK4 (époque de référence B1950) puis on appliquera la transformation permettant de passer de ce repère à celui du FK5 par exemple (pour cela voir [Bdl97]). Si le repère est l'écliptique moyen – équinoxe J2000 alors il suffit de corriger les coordonnées du pôle de l'obliquité à J2000 pour les exprimer dans un repère équatorial (par exemple par la rotation d'angle $\epsilon_0^{FK5} = 23^\circ 26' 21''.448$ autour de l'axe x).

Du fait des techniques de détermination des pôles de rotation des astéroïdes à partir de courbes photométriques [MBD⁺89] et du fait d'un nombre pas toujours suffisant de ces courbes il existe dans la plupart des cas une double indétermination

sur la direction du pôle des astéroïdes : une première par symétrie par rapport à la direction du pôle céleste nord et une deuxième quant au sens de la rotation qui se traduit par une incertitude sur la direction réelle du pôle nord³ du corps qui peut être au nord ou au sud du plan invariant du système solaire. Il en résulte que pour la plupart des astéroïdes les coordonnées réelles de leurs pôles sont parmi les solutions possibles : (λ_0, β_0) ; $(\lambda_0, -\beta_0)$; $(\lambda_0 + \pi, \beta_0)$; $(\lambda_0 + \pi, -\beta_0)$. En pratique et sans indication complémentaire nous choisirons toujours la première solution, (λ_0, β_0) .

En ce qui concerne la rotation sidérale des astéroïdes, on connaît généralement avec précision la période de rotation mais il n'existe pas d'origine précise pour initialiser cette rotation. En d'autres termes, il n'existe pas de méridien origine déterminé. Dans ce cas, le calcul du paramètre W se fait, sauf mention contraire, en prenant comme condition initiale $W_0 = 0^\circ$ et comme intervalle de temps T l'intervalle de temps entre l'époque de l'observation et l'époque choisie comme origine de la rotation sidérale du corps. Cette époque de référence est en général adoptée lors de la détermination du pôle et correspond à l'époque à laquelle sont rapportées des observations faites à différentes dates et que l'on exploite simultanément pour déterminer les paramètres physiques du corps. Cette époque de référence peut aussi être J2000. Cela a pour conséquence que les positions en longitude des points sub-terrestre et sub-solaire relativement à des détails de la surface du corps peuvent être arbitraires dans la mesure où le système de rotation du corps est défini à partir d'observations photométriques et non à partir d'observations révélant sa surface physique. En revanche les directions les unes par rapport aux autres du pôle nord de l'astre, des points sub-terrestre et sub-solaire et du pôle céleste nord sont cohérentes avec les données initiales du pôle nord de l'astre et la position du corps dans le repère choisi.

On trouvera les valeurs numériques des coordonnées des pôles des astéroïdes dans [DAB⁺96], [DFC98] pour Cérès et Vesta, et surtout dans la base de données *Asteroid Spin Vectors* de P. Magnusson [Mag95] qui regroupe tous les astéroïdes pour lesquels ces données sont connues.

2.2 Point sub-terrestre SEP

La longitude planétocentrique de la Terre (ω) est l'angle dièdre sur l'astre entre le méridien contenant la direction de la Terre et un méridien choisi comme origine (voir fig. 2 et voir §2.1). Elle est comptée à partir de ce méridien origine de 0° à 360° positivement vers l'est, que la rotation de l'astre soit prograde ou rétrograde. La latitude planétocentrique de la Terre (δ) est l'angle entre la direction planétocentrique de la Terre et le plan équatorial du corps. Elle est comptée de 0° à $+90^\circ$ vers le pôle nord de l'astre, et de 0° à -90° vers le pôle sud. Cette latitude représente aussi la déclinaison de la Terre sur la sphère céleste planétocentrique. Si (α_0, δ_0) sont les coordonnées équatoriales du pôle nord et (α_p, δ_p) les coordonnées équatoriales géocentriques du centre des masses du corps (exprimées dans un repère adéquat, voir §3) alors les coordonnées du point sub-terrestre (ω, δ) sont données par les relations :

$$\begin{aligned} \sin \delta &= -\sin \delta_0 \sin \delta_p - \cos \delta_0 \cos \delta_p \cos(\alpha_p - \alpha_0) \\ \cos(W - \omega) \cos \delta &= -\cos \delta_p \sin(\alpha_p - \alpha_0) \\ \sin(W - \omega) \cos \delta &= -\cos \delta_0 \sin \delta_p + \sin \delta_0 \cos \delta_p \cos(\alpha_p - \alpha_0) \end{aligned} \quad (2)$$

3. que l'on considère ici comme le pôle pour lequel la rotation du corps est prograde.

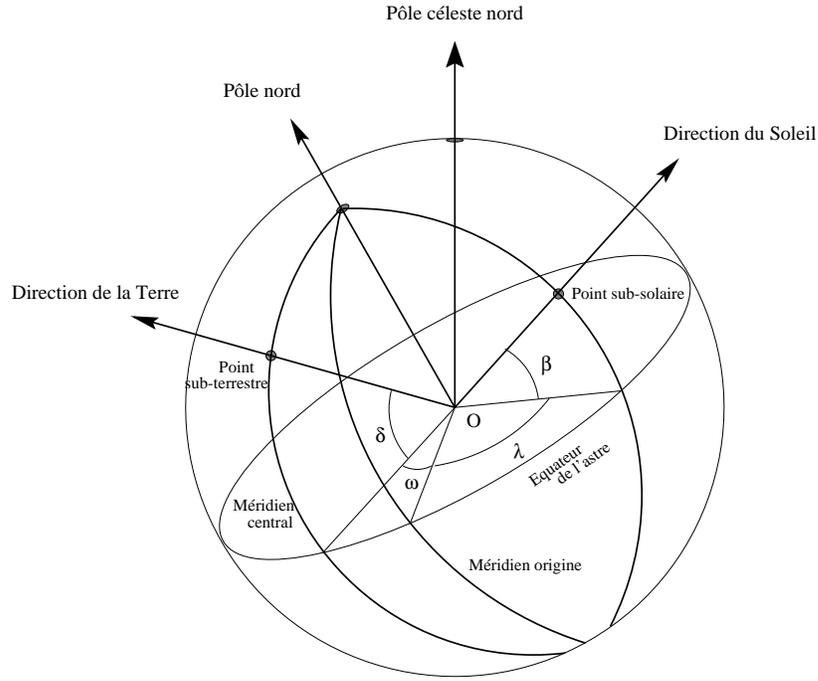


FIG. 2 – Points sub-terrestre et sub-solaire.

où W est donné par l'équation (1).

Ces coordonnées sont centrées au centre des masses du corps considéré et sont en général utilisées pour des études de dynamique. On peut aussi les exprimer dans un système de coordonnées planétographiques si l'objectif est de cartographier la surface du corps. Dans ce système la longitude planétographique du point sub-terrestre (ω') est analogue à la longitude planétocentrique. Elle est également comptée à partir du méridien origine de 0° à 360° mais dans le sens opposé à la rotation, c'est à dire positivement vers l'ouest quand la rotation est prograde et positivement vers l'est quand elle est rétrograde. Il en résulte que pour un observateur lointain la longitude planétographique du centre du disque apparent, *i.e.* le point sub-terrestre, augmente toujours avec le temps quelque soit le sens de rotation de l'astre [Bdl97]. Elle est reliée à la longitude planétocentrique par les relations :

$$\omega' = W - \omega \quad \text{si } W_1 > 0 \quad (3)$$

$$\omega' = \omega - W \quad \text{si } W_1 < 0 \quad (4)$$

La latitude planétographique d'un point de l'astre (δ') est l'angle que fait la normale à la surface en ce point avec le plan équatorial du corps. Elle est reliée à la latitude planétocentrique (δ) par la relation :

$$\tan \delta' = \frac{\tan \delta}{(1 - f)^2} \quad (5)$$

où f est l'aplatissement de l'ellipsoïde défini par $f = (a - b)/a$ si on assimile le corps à un ellipsoïde de rayon équatorial a et de rayon polaire b ($b < a$). Dans le cas d'une modélisation tri-axiale des corps célestes, le calcul des coordonnées planétographiques du point sub-terrestre est plus complexe et n'est pas traité ici.

2.3 Point sub-solaire SSP

De la même manière que pour le point sub-terrestre, on définit avec les mêmes conventions les coordonnées planétocentriques et planétographiques du Soleil - ou point sub-solaire - désignées ici par λ pour la longitude et par β pour la latitude (voir fig. 2). Si (α_0, δ_0) sont les coordonnées équatoriales du pôle nord et (α_h, δ_h) les coordonnées équatoriales héliocentriques du corps alors les coordonnées planétocentriques du point sub-solaire sont données par :

$$\sin \beta = -\sin \delta_0 \sin \delta_h - \cos \delta_0 \cos \delta_h \cos(\alpha_h - \alpha_0) \quad (6)$$

$$\cos(W - \lambda) \cos \beta = -\cos \delta_p \sin(\alpha_h - \alpha_0) \quad (7)$$

$$\sin(W - \lambda) \cos \beta = -\cos \delta_0 \sin \delta_h + \sin \delta_0 \cos \delta_h \cos(\alpha_h - \alpha_0) \quad (8)$$

et les coordonnées planétographiques par des relations analogues aux équations (3 – 5).

Les points sub-terrestre et sub-solaire sont également les points de la surface de l'astre pour lesquels la Terre et le Soleil sont au zénith. Ils permettent d'identifier clairement la partie visible de la surface du corps ainsi que les conditions de son éclairage par le Soleil.

2.4 Angle de position du pôle nord

L'angle de position du pôle nord d'un corps, PA_N , est défini comme l'angle entre la direction du pôle céleste nord et la direction du pôle nord de l'astre dans le plan tangent à la sphère céleste centré sur l'astre. Il est mesuré de 0° à 360° à partir du pôle nord céleste, positivement vers l'est sur la sphère céleste (voir fig. 3). Il est complété par la donnée de la distance angulaire (d_p) entre le centre apparent de la figure géométrique du corps et la position de son pôle nord (ou sud) dans le plan tangent. Ces deux paramètres constituent les coordonnées polaires du pôle nord (ou sud) de l'astre dans le plan tangent à la sphère céleste centré sur l'astre et sont calculés par les expressions :

$$\sin PA_N \cos \delta = -\cos \delta_0 \sin(\alpha_p - \alpha_0) \quad (9)$$

$$\cos PA_N \cos \delta = \sin \delta_0 \cos \delta_p - \cos \delta_0 \sin \delta_p \cos(\alpha_p - \alpha_0) \quad (10)$$

pour l'angle de position du pôle nord et :

$$d_p = \arctan \frac{b}{\rho} \cos \delta \quad (11)$$

pour la distance angulaire séparant le point sub-terrestre du pôle nord (ou sud), b étant ici le rayon polaire du corps et ρ la distance entre le corps et l'observateur (voir fig. 4).

2.5 Aspect visuel – magnitude

Les quantités liées à l'aspect visuel (apparent) d'un corps du système solaire sont l'angle de phase i (en degrés), la magnitude visuelle V , le rayon apparent (en secondes de degrés), les distances géocentrique et héliocentrique (exprimées en ua) ainsi que l'angle de position de l'équateur d'intensité (PA_Q) et la longueur Q du segment de droite sur l'équateur d'intensité qui n'est pas illuminée (voir fig. 3).

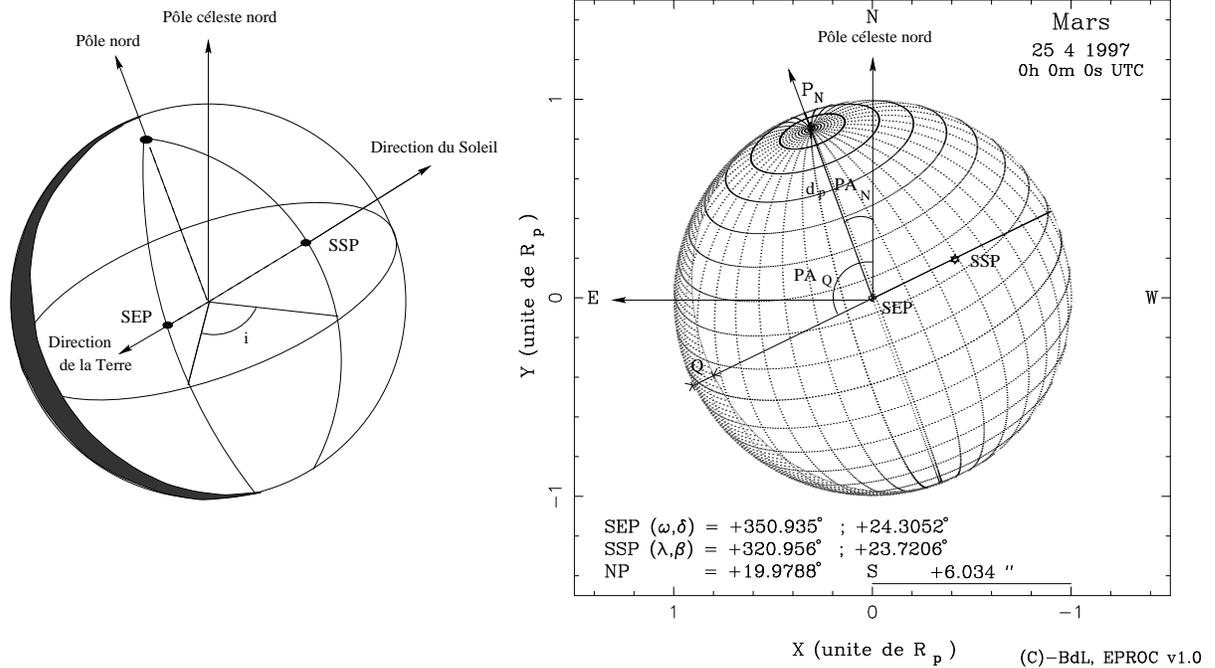


FIG. 3 – Angle de position du pôle nord de l'astre et aspect du disque apparent (Exemple pour Mars le 25 avril 1997 à 0h UTC). La figure de gauche est orientée de manière à rendre perceptible la direction de la Terre, la figure de droite présente l'astre tel qu'il est vu depuis la Terre.

2.5.1 Angle de phase

L'angle de phase d'un corps du système solaire est l'angle entre les directions du Soleil et de l'observateur vues depuis le centre du corps. Si \vec{r} et \vec{d} représentent ces deux directions, l'angle de phase peut être calculé par l'équation :

$$\tan i = \frac{\|\vec{r} \wedge \vec{d}\|}{\vec{r} \cdot \vec{d}} \quad (12)$$

La phase k , rapport de la fraction illuminée du disque visible à la surface totale du disque vue depuis la Terre, peut alors être calculée par l'expression :

$$k = \frac{1 + \cos i}{2}$$

2.5.2 Magnitude visuelle

Cas des planètes et des satellites naturels La magnitude apparente des corps du système solaire est une fonction de la distance héliocentrique r des corps, de leur distance à la Terre d et de leur angle de phase i au moment de l'observation. Si l'on néglige les variations de la magnitude en fonction de la rotation sidérale des corps, ou de tout autre origine, la magnitude totale apparente des planètes et des satellites naturels est donnée par la relation :

$$V = V(1,0) + 5 \log_{10}(dr) + \Delta m(i) \quad (13)$$

$V(1,0)$ est la magnitude de la planète à une distance de 1 ua et un angle de phase de 0° . $\Delta m(i)$ est une correction de la magnitude apparente en fonction de l'angle de phase. Cette quantité est mesurée empiriquement et résulte de deux effets :

- de la variation de magnitude en fonction de la fraction du disque illuminé visible par l'observateur,
- des propriétés de réflexion et de diffusion de la surface de la planète ou de son atmosphère.

Généralement cette quantité est exprimée sous la forme de séries de puissance de l'angle de phase dont on ne garde que les termes nécessaires pour refléter l'observation, à savoir qu'un seul terme est suffisant dans la plupart des cas ($\Delta m(i)$ est alors appelé coefficient de phase⁴) sauf pour Mercure et Vénus pour lesquelles 3 termes sont nécessaires ainsi que pour les satellites galiléens pour lesquels il en faut 2. Les tableaux 1 et 2 présentent les valeurs numériques de $V(1,0)$ et de $\Delta m(i)$ actuellement admises pour les planètes et les satellites naturels.

Planète	$V(1,0)$	$\Delta m(i)$
Mercure	-0.42	$0.0380*i - 2.73 \cdot 10^{-4}*i^2 + 2.00 \cdot 10^{-6}*i^3$
Vénus	-4.40	$0.0009*i - 2.39 \cdot 10^{-4}*i^2 - 0.65 \cdot 10^{-6}*i^3$
Mars	-1.52	$0.016*i$
Jupiter	-9.40	$0.005*i$
Saturne	-8.88	$0.044*i$
Uranus	-7.19	$0.0028*i$
Neptune	-6.87	-
Pluton	-1.01	$0.041*i$

TAB. 1 – Valeurs numériques des magnitudes $V(1,0)$ et des $\Delta m(i)$ pour les planètes [Yod95], [Sei92].

En réalité, l'estimation de la magnitude apparente d'un corps du système solaire est bien plus complexe que la formulation proposée précédemment car comme nous l'avons déjà dit, la quantité de lumière reçue par l'observateur en provenance du

4. Dans la mesure où le terme restant représente les variations de la magnitude en fonction de la fraction illuminée visible du disque apparent de la planète.

Satellite		$V(1,0)$	$\Delta m(i)$
Mars	Phobos	11.80	-
	Deimos	12.89	-
Jupiter	Io	-1.68	$0.0460*i - 0.00100*i^2$
	Europe	-1.41	$0.0312*i - 0.00125*i^2$
	Ganymède	-2.09	$0.3230*i - 0.00066*i^2$
	Callisto	-1.05	$0.0780*i - 0.00274*i^2$
Saturne	Mimas	3.30	-
	Encelade	2.10	-
	Téthys	0.60	-
	Dioné	0.88	-
	Rhéa	0.16	-
	Titan	-1.28	-
	Hypérion	4.63	-
	Japet	1.50	-
Uranus	Ariel	1.45	-
	Umbriel	2.10	-
	Titania	1.02	-
	Obéron	1.23	-
	Miranda	3.60	-
Neptune	Triton	-1.24	-
	Néreide	4.00	-
Pluton	Charon	0.90	-

TAB. 2 – Valeurs numériques des magnitudes $V(1,0)$ et des $\Delta m(i)$ pour les satellites naturels [Sei92].

corps céleste dépend fondamentalement des propriétés de sa surface (ou de son atmosphère) à réfléchir, réfracter, diffuser et absorber la lumière solaire. Pour prendre en compte cette dépendance on doit étudier en détail la composition, la forme, la structure, la rugosité, etc. de la surface du corps (ou de son atmosphère) et en déduire la meilleure loi de diffusion de la lumière applicable pour ce corps : lois empiriques telles que la loi de Lambert ou celle de Minnaert, lois théoriques telles que la loi de Lommel-Seeliger ou de Hapke établies à partir des lois et principes du transfert radiatif essentiellement déduits par Chandrasekhar (1950) [Des92]. Pour une étude détaillée de ce sujet on pourra par exemple consulter [Hap93] ou [Dou98]. Le paragraphe suivant nous en donne un exemple.

Cas de la Lune Pour prendre en compte les propriétés de la surface lunaire et estimer avec une plus grande précision la magnitude apparente de la Lune vue depuis la Terre, on peut utiliser la loi de Hapke incluant un facteur de rugosité macroscopique [Hap93] et comme valeurs numériques des paramètres de cette loi

symbole	description	valeur
$\tilde{\omega}_0$	albédo simple diffusion	0.21
h	demi largeur angulaire de l'effet d'opposition	0.07
$S(0)$	terme d'amplitude de l'effet d'opposition	0.71
b	coefficients du polynôme de Legendre modélisant la ...	0.29
c	fonction de phase de diffusion simple particulaire $P(i)$	0.39
$\bar{\theta}$	paramètre de rugosité	20
B_0	amplitude totale de l'effet d'opposition	2.01
g	paramètre d'assymétrie de la fonction $P(i)$: $g = -b/3$	-0.10

TAB. 3 – Description et valeur des paramètres de la loi de Hapke pour la Lune. Tiré de [HV87].

ceux déterminés par P. Helfenstein et J. Veverka [HV87]. Le tableau 3 résume ces paramètres et leurs valeurs. La magnitude apparente de la Lune est alors calculée de la manière suivante :

$$V = V(1, 0) + 5 \log_{10}(dr) - 2.5 \log_{10} \Delta m(i) \quad (14)$$

avec $V(1, 0) = 0.21$ et $\Delta m(i)$, la fonction de phase dans le cas des surfaces rugueuses, donnée par [Hap93] :

$$\Delta m(i) = \mathcal{K}(i, \bar{\theta}) \Phi(i, 0) \quad (15)$$

où $\mathcal{K}(i, \bar{\theta})$, le facteur de rugosité macroscopique, est calculé approximativement, pour $i \leq 60^\circ$, par la fonction empirique :

$$\mathcal{K}(i, \bar{\theta}) \approx \exp \left[-\bar{\theta} \left(0.32 \sqrt{\tan \bar{\theta} \tan \frac{i}{2}} + 0.52 \tan \bar{\theta} \tan \frac{i}{2} \right) \right]$$

Lorsque $i > 60^\circ$, cette formulation surestime \mathcal{K} et il faut alors l'estimer par interpolation parmi les valeurs numériques du tableau 4 [Hap93]. On pourra par exemple faire cette interpolation pour un angle de phase i et une pente moyenne des rugosités macroscopiques $\bar{\theta}$ donnés à l'aide d'une fonction spline bicubique [PTVF92]. Le terme $\Phi(i, 0)$ de l'équation (15) représente la fonction de phase dans le cas des surfaces lisses. Elle est calculée à partir de l'équation :

$$\begin{aligned} \Phi(i, 0) = & \frac{1}{p} \left\{ \frac{\tilde{\omega}_0}{8} [(1 + B(i, h))P(i) - 1] + \right. \\ & \frac{r_0}{2}(1 - r_0) \left[1 - \sin \frac{i}{2} \tan \frac{i}{2} \ln \cot \frac{i}{4} \right] + \\ & \left. \frac{2r_0^2}{3\pi} [\sin i + (\pi - i) \cos i] \right\} \end{aligned}$$

où p , l'albédo géométrique, est calculé par :

$$p = \frac{\tilde{\omega}_0}{8} [(1 + B_0)P(0) - 1] + \left(\frac{r_0}{2} + \frac{r_0^2}{6} \right)$$

i	$\bar{\theta}$						
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
0°	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2°	1.00	0.997	0.991	0.984	0.974	0.961	0.943
5°	1.00	0.994	0.981	0.965	0.944	0.918	0.881
10°	1.00	0.991	0.970	0.943	0.909	0.866	0.809
20°	1.00	0.988	0.957	0.914	0.861	0.797	0.715
30°	1.00	0.986	0.947	0.892	0.825	0.744	0.644
40°	1.00	0.984	0.938	0.871	0.789	0.692	0.577
50°	1.00	0.982	0.926	0.846	0.748	0.635	0.509
60°	1.00	0.979	0.911	0.814	0.698	0.570	0.438
70°	1.00	0.974	0.891	0.772	0.637	0.499	0.366
80°	1.00	0.968	0.864	0.719	0.566	0.423	0.296
90°	1.00	0.959	0.827	0.654	0.487	0.346	0.231
100°	1.00	0.946	0.777	0.575	0.403	0.273	0.175
110°	1.00	0.926	0.708	0.484	0.320	0.208	0.130
120°	1.00	0.894	0.617	0.386	0.243	0.153	0.094
130°	1.00	0.840	0.503	0.290	0.175	0.107	0.064
140°	1.00	0.747	0.374	0.201	0.117	0.070	0.041
150°	1.00	0.590	0.244	0.123	0.069	0.040	0.023
160°	1.00	0.366	0.127	0.060	0.032	0.018	0.010
170°	1.00	0.128	0.037	0.016	0.0085	0.0047	0.0026
180°	1.00	0	0	0	0	0	0

TAB. 4 – *Facteur de correction de la rugosité macroscopique $\mathcal{K}(g, \bar{\theta})$ pour la fonction de phase intégrale. Tiré de [Hap93].*

avec $r_0 = (1 - \gamma)/(1 + \gamma)$, $\gamma = \sqrt{1 - \tilde{\omega}_0}$. La fonction d'opposition, $B(i, h)$, est définie par :

$$B(i, h) = B_0 / [1 + \frac{1}{h} \tan \frac{i}{2}]$$

où h est la demi largeur angulaire de l'effet d'opposition, liée à la porosité. L'amplitude de l'effet d'opposition, B_0 , est calculée par :

$$B_0 = \frac{S(0)}{\tilde{\omega}_0 P(0)}$$

où $S(0)$ caractérise la contribution à l'effet d'opposition de la lumière diffusée par la portion de surface des particules qui font face à la source lorsque la phase est nulle. Enfin la fonction de phase de diffusion simple particulaire, $P(i)$, est définie par le polynôme de Legendre [HV87] :

$$P(i) = 1 + b \cos i + c(1.5 \cos^2 i - 0.5)$$

où les paramètres b et c sont fournis dans le tableau 3.

On pourra de même estimer la fonction de phase des autres corps du système solaire à la condition de posséder des valeurs numériques des paramètres de la loi de Hapke. Actuellement on en trouve principalement pour les satellites galiléens de Jupiter, les satellites de Saturne Mimas, Encelade et Rhéa, les satellites d'Uranus Miranda, Ariel, Umbriel, Titania et Obéron et enfin les satellites de Neptune Triton et Néréïde [VH98].

Cas des astéroïdes et des comètes La magnitude visuelle apparente des astéroïdes est calculée à partir de la formule de Bowell adoptée par l'IAU en 1985 [IAU85] :

$$V = H + 5 \log_{10}(dr) - 2.5 \log_{10}[(1 - G)\phi_1 + G\phi_2] \quad (16)$$

où H est la magnitude absolue de l'astéroïde ($H(1, 0)$), G un paramètre de pente et ϕ_1, ϕ_2 des fonctions de phase empiriques telles que :

$$\phi_j = \exp \left[-A_i \left(\tan \frac{i}{2} \right)^{B_i} \right], \quad j = 1, 2$$

avec $A_1 = 3.33$, $A_2 = 1.87$, $B_1 = 0.63$ et $B_2 = 1.22$, i étant l'angle de phase. Les valeurs numériques des paramètres H et G pour tous les astéroïdes connus sont par exemple fournies dans la base de données astéroïdales de T. Bowell, *The Asteroid Orbital Elements Database* [Bow96].

Dans le cas des comètes, on distingue la magnitude totale (noyau + queues), m_1 , de la magnitude du noyau, m_2 , que l'on calcule par les relations :

$$m_j = H_j + R_j \log_{10}(r) + D_j \log_{10}(d), \quad j = 1, 2 \quad (17)$$

où H_j , R_j et D_j pour chaque comète sont calculés à chaque passage à proximité du Soleil [Roc98]. Par exemple, pour la comète 46P/Wirtanen, ces paramètres sont pour son prochain passage en 2002 :

$$H_1 = 11.861 \pm 0.18$$

$$H_2 = 16.77 \pm 0.16$$

$$R_1 = 10$$

$$R_2 = 5$$

$$D_1 = 5$$

$$D_2 = 5$$

2.5.3 Rayon apparent

La dimension apparente d'un corps du système solaire pour un observateur donné est caractérisée par le rayon (ou diamètre) équatorial apparent du corps, s_{eq} , et éventuellement par son rayon polaire apparent, s_{po} (voir fig. 4). Si a et b représentent les rayons équatorial et polaire alors :

$$s_{eq} = \arctan \frac{a}{\rho} \quad (18)$$

$$s_{po} = a(1 - f(1 - \sin^2 \delta)) \quad (19)$$

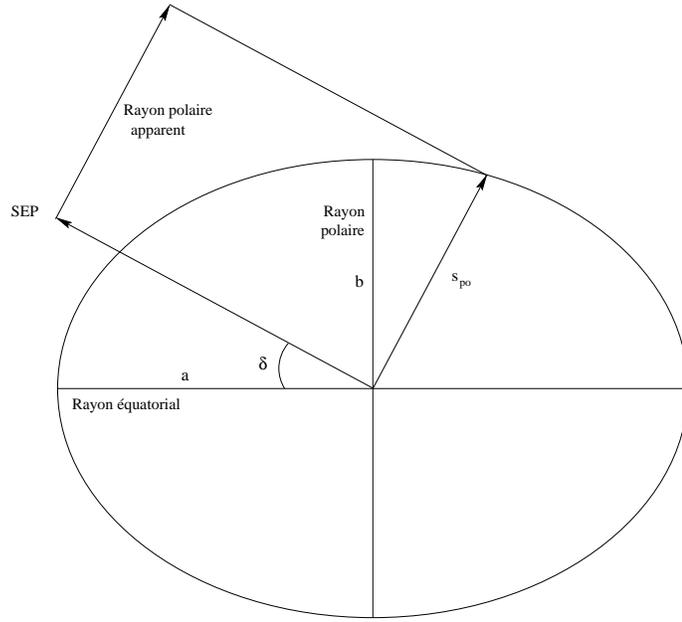


FIG. 4 – *Rayon polaire apparent.*

où ρ est la distance entre le corps céleste et l'observateur⁵, f le coefficient d'aplatissement du corps ($f = 1 - b/a$) et δ la latitude du point sub-terrestre (ou de façon plus générale sub-observateur).

2.5.4 Équateur d'intensité

L'équateur d'intensité est défini par le grand cercle passant par les points sub-terrestre et sub-solaire. Il sert de plan de référence en photométrie planétaire pour mesurer les coordonnées des points de la surface du corps et relier les longitudes et latitudes photométriques de ces points aux angles d'incidence, de phase et de réflexion (ou d'observation) de la lumière solaire.

En pratique, l'équateur d'intensité peut être défini par son angle de position par rapport à la direction du pôle céleste nord, PA_Q , et par la donnée de la longueur Q du segment de droite sur l'équateur d'intensité qui n'est pas illuminée (voir fig. 3). Ces deux paramètres sont calculés par les équations :

$$PA_Q = \begin{cases} PA_S + \pi & \text{si } PA_S < \pi \\ PA_S - \pi & \text{si } PA_S \geq \pi \end{cases} \quad (20)$$

$$Q = 2 s_{eq} \frac{1 - (1 - s_{po}/a) \sin^2(PA_S - PA_N + \frac{\pi}{2})}{1 - k} \quad (21)$$

où PA_S et PA_N sont respectivement les angles de position de la direction du point sub-solaire et de la direction du pôle nord de l'astre (voir §2.4). L'angle PA_S est calculé de la même manière que PA_N en remplaçant les coordonnées du pôle nord du corps par celles de la direction du Soleil vue depuis le corps dans les équations (9).

⁵. A l'échelle des distances inter-planétaires le rayon équatorial apparent peut être calculé plus simplement par : $s_{eq} = a/\rho$

3 Calcul des éphémérides

3.1 Sources des éphémérides

Les éphémérides planétaires sont issues, au choix, des théories VSOP82 [Bre82] ou DE200 [Sta82] ou VSOP87 [BF88] ou DE403 [SNWF95]. Pour les satellites naturels, les éphémérides sont calculées à partir des théories du mouvement ESA-PHO/ESADEI pour les satellites de Mars [CT90], SAMPSON-LIESKE pour les satellites galiléens de Jupiter [Lie80], [Arl82], TASS1.7 pour les 8 premiers satellites de Saturne [VD95] et GUST86 pour les satellites d'Uranus [Las87]. Pour les astéroïdes, leurs éphémérides sont obtenues par intégration numérique du problème perturbé par les neuf planètes principales. L'algorithme de calcul est celui de Bulirsch et Stoer [SB80], [BS66]. Les positions et les masses des planètes perturbatrices sont calculées à l'aide des théories décrites précédemment. Les conditions initiales des astéroïdes sont données par les éléments osculateurs tirés des *Ephemerides for Minor Planets* [BS95], ou d'autres bases de données astéroïdales comme *The Asteroid Orbital Elements Database* de T. Bowell [Bow96], ou les bases *IRAS Minor Planet Survey* [Ted92] ou *Asteroids II* [Ted88].

Les éphémérides de position des corps du système solaire sont basées sur l'utilisation des algorithmes de calcul d'éphémérides décrits par Kaplan et al. [KHSS89]. La géométrie est euclidienne et les mouvements sont newtonniens. Les masses des planètes sont celles des jeux UAI 1976 et IERS 1992 en fonction du choix de la théorie planétaire (UAI 1976 pour VSOP82, DE200 et VSOP87 ; IERS 1992 pour DE403 à l'exception des masses de Saturne et Uranus qui sont propres à DE403). Les constantes astronomiques sont celles des systèmes UAI 1976, UAI 1982 et IERS 1992 selon le cas. Les positions des corps sont exprimées dans les systèmes de références FK5 pour VSOP82, DE200 et VSOP87 et ICRF pour DE403. Pour plus d'informations sur la manière dont sont calculées les éphémérides de position des corps célestes on consultera [Ber98].

Les éphémérides physiques sont basées sur les définitions et les constantes entérinées par l'Union Astronomique Internationale, qui a suivi les recommandations du IAU/IAG/COSPAR Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements on the Planets and Satellites. Ce groupe de travail publie tous les trois ans (Davies *et al.*, 1980a, 1980b, 1983a, 1983b, 1986, 1989, 1992, 1996) la liste remise à jour des valeurs numériques des paramètres de rotation des planètes, des satellites naturels et de quelques astéroïdes [DAB⁺96].

3.2 Mise en œuvre

L'objectif des éphémérides pour l'observation physique des corps du système solaire est de représenter, de façon réaliste, l'aspect apparent et les conditions d'éclairage par le Soleil d'un corps du système solaire observé par un observateur donné à une époque donnée. C'est pourquoi les calculs d'éphémérides de position des corps célestes doivent prendre en compte toute correction modifiant la direction apparente du corps relativement à l'observateur, comme les aberrations de la lumière ou encore la précession et la nutation. Autrement dit, cela signifie que les calculs d'éphémérides de position doivent être exprimés dans un repère apparent de la date, c'est à dire dans un repère dont le plan de référence est l'équateur vrai de la date et dont une

direction de référence (dans ce plan) est orientée selon la direction de l'équinoxe de la date.

3.2.1 Cas géocentrique

La définition d'un repère apparent telle qu'elle est présentée par Kaplan *et al.* prend tout son sens lorsque le centre du repère est le centre des masses de la Terre [KHSS89]. Dans un tel repère les coordonnées apparentes d'un corps sont obtenues à partir de ses coordonnées géocentriques géométriques (issues des théories planétaires) en leur appliquant successivement les corrections de temps de lumière, de déflexion des rayons lumineux, d'aberration annuelle, de précession et de nutation [Ber98]. L'échelle de temps des calculs est le Temps terrestre (TT). Comme l'échelle de temps accessible aux observateurs terrestres est le Temps universel coordonné (UTC), diffusé par exemple par les ondes radio, les résultats des éphémérides pourront être exprimés en UTC. Les différences entre les deux échelles entre 1950 et 2000 sont présentées figure 5.

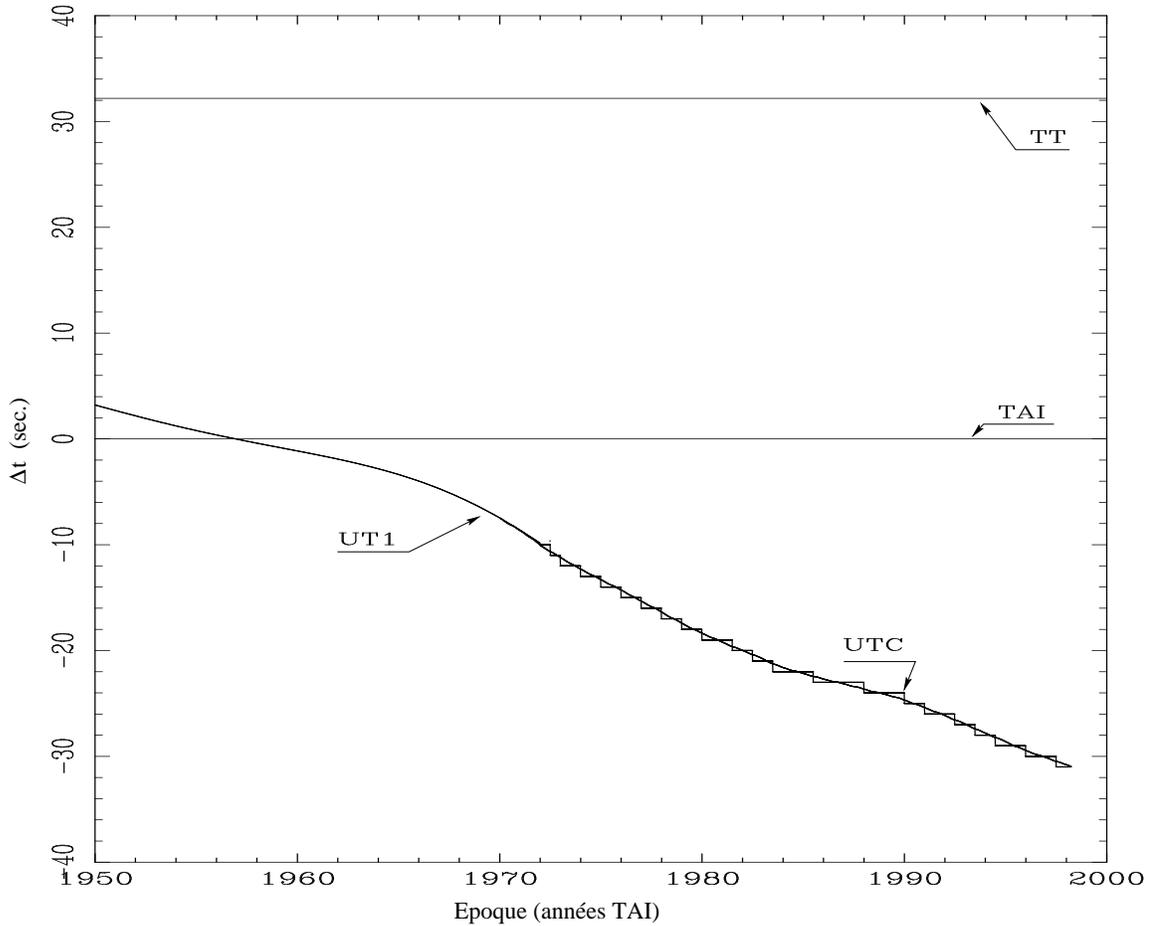


FIG. 5 – Différences entre les échelles de temps TAI, TT, UT1 et UTC.

3.2.2 Cas des sondes spatiales

Dans le cas des sondes spatiales il est nécessaire de définir autrement ce que représente un repère apparent de la date. Le plan de référence privilégié pour décrire le mouvement d'une sonde spatiale dans le système solaire est naturellement l'écliptique J2000. Pour être homogène avec les repères de référence des systèmes de rotation des planètes, on peut choisir comme plan de référence l'équateur J2000, relié à l'écliptique J2000 par l'obliquité à J2000 : $\epsilon_0^{FK5} = 23^\circ 26' 21''.448$. Sauf mention contraire, aucune précession ni nutation n'affectera cet équateur J2000. Ainsi l'équateur vrai et l'équinoxe de la date définissant le repère apparent pour la sonde spatiale coïncideront avec l'équateur J2000 et l'équinoxe J2000. Du point de vue des aberrations de la lumière, et comme ici l'espace de référence est un espace euclidien, il n'y a aucune différence entre le fait d'être au centre de la Terre ou à bord de la sonde spatiale. Les corrections d'aberrations et de déflexion de la lumière seront donc calculées de la même manière que dans le cas géocentrique. L'échelle de temps des calculs est le Temps terrestre, seule échelle de temps adéquate pour décrire le mouvement de la sonde dans le système solaire (si l'on fait exception des échelles de temps de la relativité).

3.2.3 Remarques

Illumination des corps du système solaire Jusqu'à présent nous avons défini la position d'un corps céleste par rapport à l'observateur, ce qui nous permet de connaître le point sub-terrestre et l'aspect apparent du corps pour l'observateur. Il reste à définir les conditions d'éclairement du corps par le Soleil. Pour cela nous devons connaître la direction vraie du Soleil depuis le corps à l'instant de l'observation. Dans le cas géocentrique, cette direction est donnée par la direction géométrique du Soleil depuis le corps étudié corrigée de la précession et de la nutation pour être exprimée dans le même repère que celui de l'observateur (repère vrai de la date). Dans le cas des sondes spatiales, la direction vraie du Soleil depuis le corps est donnée directement par sa direction géométrique dans la mesure où ni précession ni nutation n'affecte la direction de l'axe principal de mouvement de la sonde sur elle-même (axe pouvant servir à définir un repère de référence privilégié pour orienter un axe de visée depuis la sonde). Dans tous les cas, cela revient à considérer que l'illumination du corps est le fait de photons lumineux présents à l'endroit du corps et qu'il ré-émet, entre autre, en direction de l'observateur selon ses propriétés de réflectance.

Précision des éphémérides pour l'observation physique On peut estimer de manière très large la précision de la position d'un corps céleste relativement à l'observateur à quelques $0''.1$ et parfois mieux [Ber98]. En revanche, la précision des paramètres de la rotation des corps (α_0 , δ_0 , W_0) est de quelques $0^\circ.01$ si on considère le degré de troncature de leurs valeurs numériques. Dans la pratique, cette précision pourra largement être dégradée si par exemple le pôle du corps admet une précession (il existe de nombreux cas de mouvement de culbute des axes de rotation des astéroïdes) ou si sa rotation sidérale est chaotique (cas d'Hypérioron par exemple). On considérera donc que la précision des paramètres calculés (SEP, SSP, PA_N , PA_Q , PA_S) est de l'ordre de $0^\circ.1$.

4 Représentation graphique

L'idéal pour visualiser le plus fidèlement possible l'aspect apparent d'un corps céleste est de posséder une description analytique ou numérique de sa surface. Cependant il n'existe qu'un petit nombre de tels modèles, concernant quelques satellites naturels de forme irrégulière (Phobos, Deimos, Epiméthée, Janus et Hypérion), deux astéroïdes (Ida, Gaspra), la Lune et les planètes telluriques (Mercure, Vénus, Mars). Dans les autres cas, une bonne représentation graphique peut être obtenue à partir de formes ellipsoïdales ($a \geq b > c$) ou sphériques ($a = b = c$).

4.1 Modèles géométriques

Le tableau 5 regroupe les rayons des ellipsoïdes actuellement admis pour les planètes, les principaux satellites naturels, quelques astéroïdes et la comète 46P/Wirtanen. Pour une vision d'ensemble de tous les modèles géométriques de la forme des corps du système solaire, on consultera [Bdl97] ou [Bdl98] et [Mag95].

Du point de vue géométrique, il peut être intéressant de définir le contour de l'astre dans la direction de visée (pour la prédiction et la réduction des occultations stellaires par exemple). Cette direction correspondant à la direction du point sub-observateur (c.f §2.2), le contour de l'astre peut être calculé comme l'ensemble des points d'intersection entre l'ellipsoïde modélisant la surface du corps et l'ensemble des plans parallèles à la direction sub-observateur (SEP) et tangent à l'ellipsoïde de façon à décrire le contour du corps (fig. 6). Soit, après développements, on peut exprimer le contour du corps à l'aide d'une représentation paramétrique en fonction de l'angle θ par les équations :

$$\left\{ \begin{array}{l} x = -\frac{a}{x_{sep}} \left(\frac{y_{sep}}{b} y + \frac{z_{sep}}{c} z \right) \\ y = u^{-1/2} \cos \theta - \frac{w}{u} \left(v - \frac{w^2}{u} \right)^{-1/2} \sin \theta \\ z = \left(v - \frac{w^2}{u} \right)^{-1/2} \sin \theta \\ \theta \in [0, 2\pi] \end{array} \right. \quad (22)$$

où a, b, c sont les rayons de l'ellipsoïde, $(x_{sep}, y_{sep}, z_{sep})$ la direction sub-observateur exprimée en coordonnées rectangulaires et où u, v et w sont donnés par les relations :

$$\begin{aligned} u &= \frac{1 + (y_{sep}/x_{sep})^2}{b^2} \\ v &= \frac{1 + (z_{sep}/x_{sep})^2}{c^2} \\ w &= \frac{y_{sep} z_{sep}}{b c x_{sep}^2} \end{aligned}$$

et correspondent à un changement de variable intermédiaire. Finalement, le contour du corps vu par l'observateur, compte tenu de son attitude par rapport à l'observa-

TAB. 5 – *Rayons des ellipsoïdes des corps du système solaire.*

Corps	<i>a</i>		<i>b</i>		<i>c</i>		Références
	km	km	km	km	km	km	
Mercure	2440.623	± 0.108	2439.305	± 0.113	2432.900	± 8.800	[AJLI96]
Vénus	6051.8	± 1.0	idem		idem		[Bdl98]
Mars	3397.0	± 4.0	3397.0	± 4.0	3375.0	± 4.0	[Bdl98]
Jupiter	71492.0	± 4.0	71492.0	± 4.0	66854.0	± 10.0	[Bdl98]
Saturne	60268.0	± 4.0	60268.0	± 4.0	54364.0	± 10.0	[Bdl98]
Uranus	25559.0	± 4.0	25559.0	± 4.0	24973.0	± 20.0	[Bdl98]
Neptune	24764.0	± 15.0	24764.0	± 15.0	24341.0	± 30.0	[Bdl98]
Pluton	1195.0	± 15.0	idem		idem		[Bdl98]
Lune	1737.103	± 0.015	idem		idem		[SZNL97]
Phobos	13.0		11.4		9.2		[STCV93]
Deïmos	7.5		6.1		5.2		[Bdl98]
Io	1830.0	± 0.2	1818.7	± 0.2	1815.3	± 0.2	[Bdl98]
Europe	1565.0	± 8.0	idem		idem		[Bdl98]
Ganymède	2634.0	± 10.0	idem		idem		[Bdl98]
Callisto	2403.0	± 5.0	idem		idem		[Bdl98]
Mimas	209.1	± 0.5	196.2	± 0.5	191.4	± 0.5	[Bdl98]
Encelade	256.3	± 0.3	247.3	± 0.3	244.6	± 0.5	[Bdl98]
Théthys	535.6	± 1.2	528.2	± 1.2	525.8	± 1.2	[Bdl98]
Dioné	560.0	± 5.0	idem		idem		[Bdl98]
Rhéa	764.0	± 4.0	idem		idem		[Bdl98]
Titan	2575.0	± 2.0	idem		idem		[Bdl98]
Hypériorion	180.0	± 20.0	140.0	± 20.0	112.5	± 20.0	[Bdl98]
Japet	718.0	± 8.0	idem		idem		[Bdl98]
Ariel	581.1	± 0.9	577.9	± 0.6	577.7	± 1.0	[Bdl98]
Umbriel	584.7	± 2.8	idem		idem		[Bdl98]
Titania	788.9	± 1.8	idem		idem		[Bdl98]
Obéron	761.4	± 2.6	idem		idem		[Bdl98]
Miranda	240.4	± 0.6	234.2	± 0.9	232.9	± 1.2	[Bdl98]
Cérés	509.0	± 5.0	472.5	± 6.5	444.0	± 5.0	[DFC98]
Pallas	291.5	± 9.0	263.5	± 1.5	204.5	± 26.0	[DC89]
Vesta	285.5	± 1.0	272.0	± 1.0	217.0	± 2.0	[DFC98]
Ida	30.0		12.6		9.3		[DAB+96]
Gaspra	9.1		5.2		4.7		[DAB+96]
46P/Wirtanen	0.58		0.58		0.34		[MBH97]

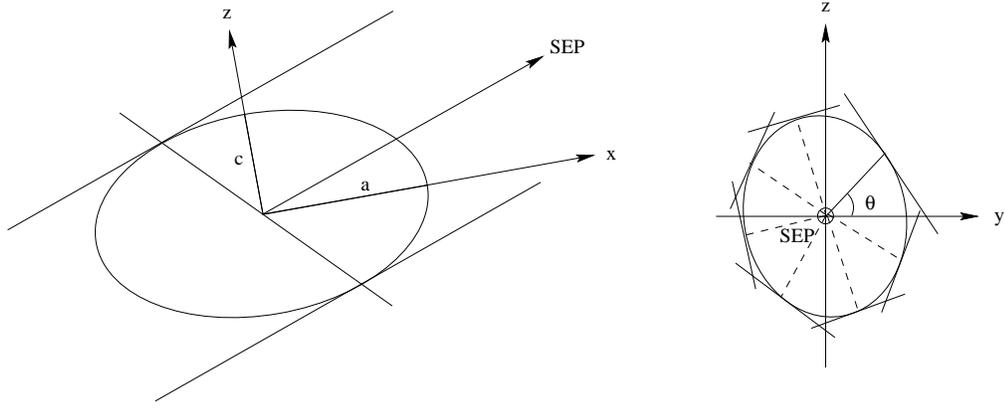


FIG. 6 – Représentation du contour d’un corps dans la direction sub-observateur.

teur, pourra être défini par les équations:

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} = \mathcal{R}_x(PA_N) \mathcal{R}_y(\delta) \mathcal{R}_z(\omega) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (23)$$

De la même façon on peut exprimer le contour séparant la partie éclairée de la partie sombre de la surface du corps en remplaçant la direction sub-observateur par la direction sub-solaire dans les équations précédentes.

4.2 Modèles topographiques

Il existe pour un certain nombre de corps du système solaire des modèles topographiques de leur surface réelle ou de leur forme globale et des modèles de leur champ de gravité (permettant par exemple de définir des surfaces d’équipotentiel et matérialiser ainsi la surface du corps). Ces modèles sont exprimés sous forme analytique (à l’aide d’harmoniques sphériques ou de fonctions de Legendre par exemple) ou sous forme numérique [STCV93]. Le tableau 6 donne une description et les références des modèles topographiques disponibles actuellement (liste non exhaustive). En pratique, ces modèles seront utilisés sous leur forme numérique qui consiste en une grille de $2^\circ \times 2^\circ$ ou $5^\circ \times 5^\circ$ selon le corps et pour laquelle chaque point est défini par une longitude, une latitude et la distance au centre du corps dans un repère planétocentrique. On trouvera dans [Nod98] la plupart de ces modèles topographiques sous forme numérique, à l’exception de ceux des planètes telluriques et de la Lune que l’on trouvera dans la littérature ou par exemple sur le serveur de données géophysiques de la NASA : *Planetary Data System Geophysics Subnode*, [Sub98]. Les figures 7 et 8 présentent deux exemples de ces modèles.

Corps	Modèle	Source	Référence
Mercure	fonctions de Legendre grille $2^\circ \times 2^\circ$	radars, Mariner 10	[AJLI96]
Vénus	harmoniques sphériques grille $2^\circ \times 2^\circ$	Magellan, Pioneer, Vénéra	[RP94]
Lune	harmoniques sphériques grille $2^\circ.5 \times 2^\circ.5$	Clementine	[SZNL97]
Mars	harmoniques sphériques grille $2^\circ \times 2^\circ$	Viking orbiter, Mariner 9	[SZ96]
Phobos	modèle numérique grille $2^\circ \times 2^\circ$	Viking orbiter	[STCV93]
Deimos	modèle numérique grille $5^\circ \times 5^\circ$	Viking orbiter	[STCV93]
Ida	modèle numérique grille $2^\circ \times 2^\circ$	Galileo	[TBC ⁺ 96]
Gaspra	modèle numérique grille $2^\circ \times 2^\circ$	Galileo	[TVS ⁺ 94]
Epiméthée	modèle numérique grille $5^\circ \times 5^\circ$	Voyager 1, 2	[Nod98]
Janus	modèle numérique grille $5^\circ \times 5^\circ$	Voyager 1, 2	[Nod98]
Hypérion	modèle numérique grille $5^\circ \times 5^\circ$	Voyager 2	[Nod98]

TAB. 6 – Description et référence des modèles topographiques.

FIG. 7 – Modèles topographique et géométrique de Phobos.

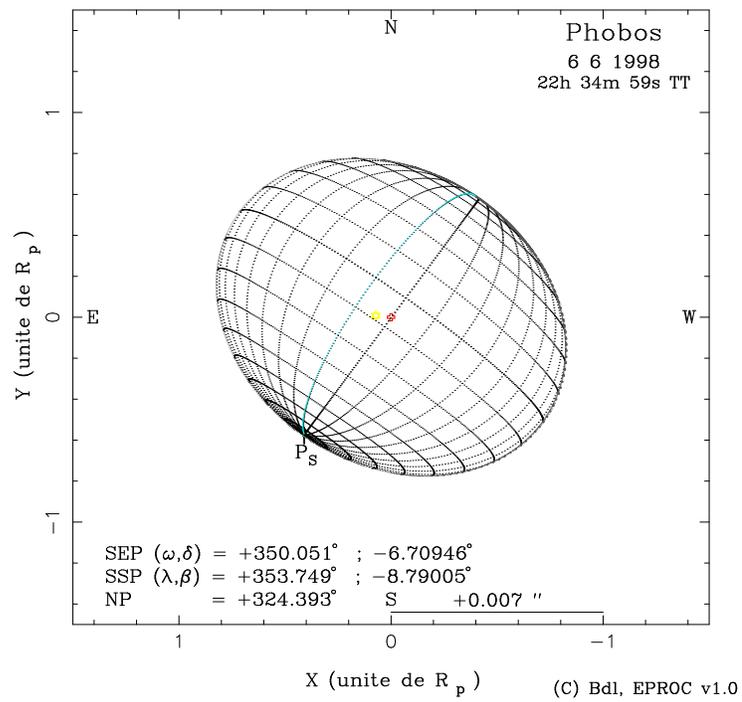
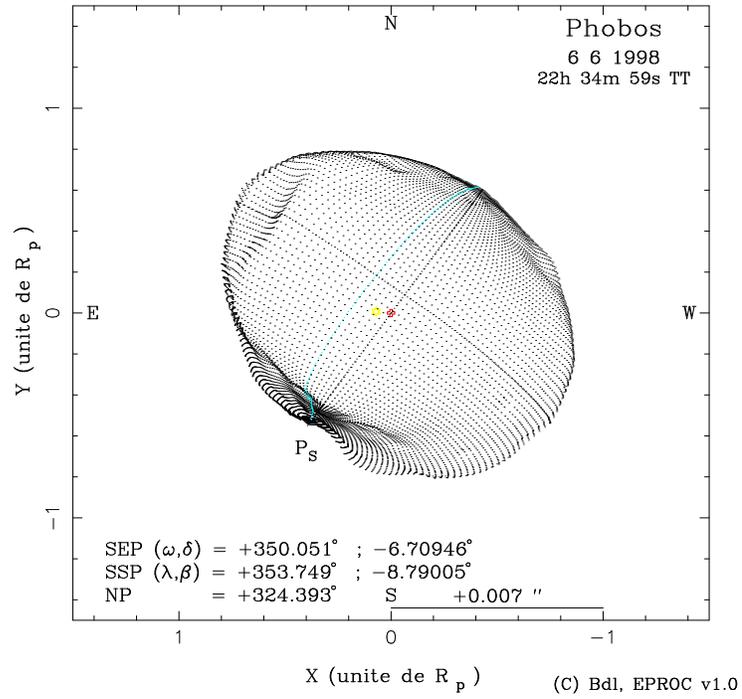
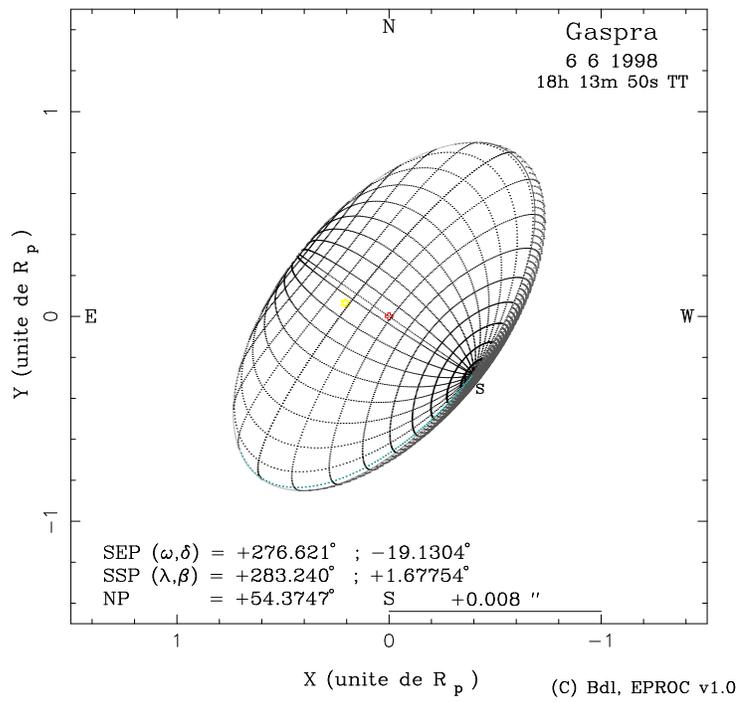
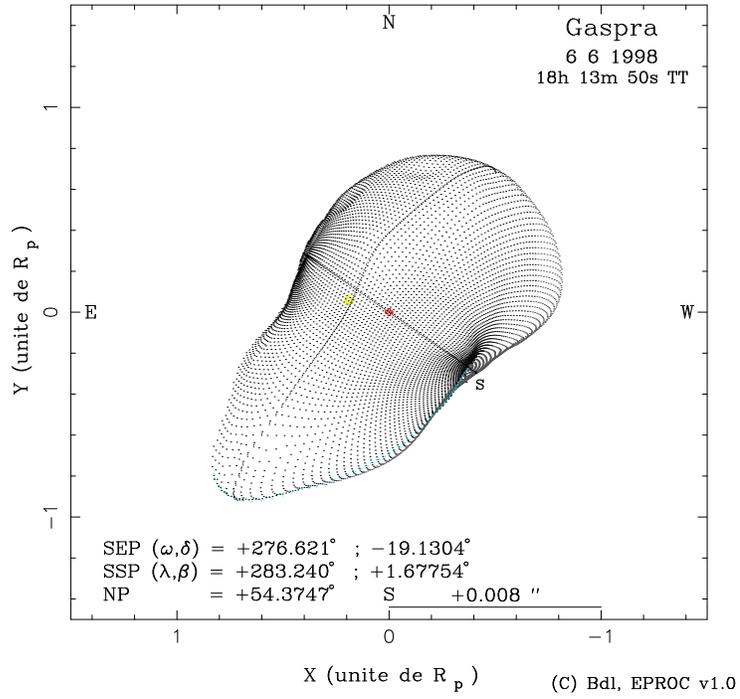


FIG. 8 – Modèles topographique et géométrique de (951) Gaspra.



Références

- [AJLI96] J.D. Anderson, R.F. Jurgens, E.L. Lau, and M.A. Slade III. Shape and orientation of Mercury from radar ranging data. *Icarus*, **124**:690–697, 1996.
- [Arl82] J.E. Arlot. New constants for Sampson-Lieske theory. *Astron. Astrophys.*, **107**:305, 1982.
- [Bdl97] Bureau des longitudes, editor. *Introduction aux éphémérides astronomiques*. Les éditions de physique, 1997.
- [Bdl98] Bureau des longitudes. Données astrométriques et paramètres pour les éphémérides physiques des corps du système solaire. Technical report, http://www.bdl.fr/solarsys/projet/tab_princ_frame.html, 1998.
- [Ber98] J. Berthier. Serveur d'éphémérides du bureau des longitudes. Définitions relatives aux éphémérides de position des corps célestes. *Notes Scientifiques et Techniques S060*, Bureau des longitudes, 1998.
- [BF88] P. Bretagnon and G. Francou. Planetary theories in rectangular and spherical variables. VSOP87 solutions. *Astron. Astrophys.*, **202**:309, 1988.
- [Bow96] E. Bowell. The asteroid orbital elements database. Technical report, Lowell Observatory: <ftp://ftp.lowell.edu/pub/elgb/astorb.html>, 1996.
- [Bre82] P. Bretagnon. Théorie du mouvement de l'ensemble des planètes. solution VSOP82. *Astron. Astrophys.*, **114**:278, 1982.
- [BS66] R. Bulirsch and J. Stoer. *Numerische Mathematik* **8**, 1, 1966.
- [BS95] Y.V. Batrakov and V.A. Shor. Catalogue of orbital elements and photometric parameters of 6160 minor planets numbered by 18 november, 1994. Technical report, Institute of Theoretical Astronomy, 1995.
- [CT90] M. Chapront-Touzé. Orbits of the martian satellites from ESAPHO and ESADE theories. *Astron. Astrophys.*, **240**:159, 1990.
- [CTFM94] M. Chapront-Touzé, G. Francou, and B. Morando. Les systèmes de référence utilisés en astronomie. *Notes Scientifiques et Techniques S046*, Bureau des longitudes, 1994.
- [DAB⁺96] M.E. Davies, V.K. Abalakin, M. Bursa, J.H. Lieske, B. Morando, D. Morrison, P.K. Seidelmann, A.T. Sinclair, B. Yallop, and Y.S. Tjufflin. Report of the IAU/IAG/COSPAR working group on cartographic coordinates and rotational elements of the planets and satellites: 1994. *Celes. Mech.*, **63**:127–148, 1996.
- [DC89] J.D. Drummond and W.J. Cocke. Triaxial ellipsoid dimensions and rotational pole of (2) Pallas from two stellar occultations. *Icarus*, **78**:323–329, 1989.

- [Des92] P. Descamps. Etude des effets de surface sur la réduction astrométrique des observations de phénomènes des satellites galiléens de jupiter. Master's thesis, Observatoire de Paris, 1992.
- [DFC98] J.D. Drummond, R.Q. Fugate, and J.C. Christou. Full adaptive optics images of asteroids Ceres and Vesta ; rotational poles and triaxial ellipsoid dimensions. *Icarus*, **132**:80–99, 1998.
- [Dou98] S. Doute. Modélisation numérique de la réflectance spectrale des surfaces glacées du système solaire. Application à l'analyse de spectres de Triton et Pluton et au traitement d'images hyperspectrales NIMS de Io. Master's thesis, Université Denis Diderot (Paris 7), 1998.
- [Hap93] B. Hapke. *Theory of reflectance and emittance spectroscopy*. Cambridge University Press, 1993.
- [HV87] P. Helfenstein and J. Veverka. Photometric properties of lunar terrains derived from Hapke's equation. *Icarus*, **72**:342–357, 1987.
- [IAU85] *Proceedings of the 19^e general assembly - Transactions of the IAU*, volume XIXB, 1985.
- [KHSS89] G.H. Kaplan, J.A. Hughes, P.K. Seidelmann, and C.A. Smith. Mean and apparent place computations in the new IAU system. III. Apparent, topocentric, and astrometric places of planets and stars. *Astron. Journal.*, **97**(4), 1989.
- [Kop66] Z. Kopal. *An introduction to the study of the Moon*. D. Reidel publishing company, 1966.
- [Las87] J. Laskar. GUST86 - an analytical ephemeris of the uranian satellites. *Astron. Astrophys.*, **188**:212, 1987.
- [Lie80] J.H. Lieske. Improved ephemerides of the galilean satellites. *Astron. Astrophys.*, **82**:340, 1980.
- [Mag95] P. Magnusson. Asteroid spin vector determinations. Technical report, Uppsala Astronomical Observatory : <ftp://ftp.astro.uu.se/pub/Asteroids/SpinVectors/>, 1995.
- [MBD⁺89] P. Magnusson, M.A. Barucci, J.D. Drummond, K. Lumme, S.J. Ostro, J. Surdej, R.C. Taylor, and V. Zappalà. Determinations of pole orientations and shapes of asteroids. In P. Binzel, T. Gehrels, and M.S. Matthews, editors, *Asteroid II*, pages 66–97. The University of Arizona Press, 1989.
- [MBH97] K.J. Meech, J.M. Bauer, and O.R. Hainaut. Rotation of comet 46P/Wirtanen. *Astron. Astrophys.*, **326**:1268–1276, 1997.
- [Nod98] PDS Small Bodies Node. SBN asteroid data: Physical parameters. Technical report, http://pdssbn.astro.umd.edu/sbnhtml/asteroids/physical_param.html, 1998.

- [PTVF92] W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, and B.P. Flannery. *Numerical Recipes in Fortran*. Cambridge University Press, 1986, 1992. second edition.
- [Roc98] P. Rocher. Notes cométaires. Technical report, Bureau des longitudes : <http://www.bdl.fr/ephem/comets/HTML/francais/Comete.html>, 1998.
- [RP94] N. Rappaport and J.J. Plaut. A 360 degree and order model of Venus topography. *Icarus*, **112**:27–33, 1994.
- [SB80] J. Stoer and R. Bulirsch. *Introduction to numerical analysis*. Springer-Verlag New York Inc., 1980.
- [Sei92] P.K. Seidelmann, editor. *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*. University Science Books, 1992.
- [SNWF95] E.M. Standish, X.X. Newhall, J.G. Williams, and W.F. Folkner. JPL planetary and lunar ephemerides, DE403/LE403. *JPL IOM*, **314**:10–127, 1995.
- [Sta82] E.M. Standish. Orientation of the JPL ephemerides DE200/LE200 to the dynamical equinox of J2000. *Astron. Astrophys.*, **114**:297–302, 1982.
- [STCV93] D.P. Simonelli, P.C. Thomas, B.T. Carcich, and J. Veverka. The generation and use of numerical shape models for irregular solar system objects. *Icarus*, **103**:49–61, 1993.
- [Sub98] PDS Geophysics Subnode. NASA Planetary Data System Geophysics Subnode. Technical report, <http://pds-geophys.wustl.edu/pds/>, 1998.
- [SZ96] D.E. Smith and M.T. Zuber. The shape of Mars and the topographic signature of the hemispheric dichotomy. *Science*, **271**:184–188, 1996.
- [SZNL97] D.E. Smith, M.T. Zuber, G.A. Neumann, and F.G. Lemoine. Topography of the moon from the Clementine lidar. *Journal of geophysical research*, **102**:1591–1611, 1997.
- [TBC⁺96] P.C. Thomas, M.J.S. Belton, B. Carcich, C.R. Chapman, M.E. Davies, R. Sullivan, and J. Veverka. The shape of ida. *Icarus*, **120**:20–32, 1996.
- [Ted88] E.F. Tedesco. The IRAS minor planet survey (IMPS) data base. Technical report, Jet Propulsion Laboratory, 1988.
- [Ted92] E.F. Tedesco. The IRAS minor planet survey (IMPS) data base. Technical report PL-TR-92-2049, Philips Laboratory, Hanscom Air Force Base, 1992.
- [TVS⁺94] P.C. Thomas, J. Veverka, D. Simonelli, P. Helfenstein, B. Carcich, M.J.S. Belton, M.E. Davies, and C. Chapman. The shape of gaspra. *Icarus*, **107**:25–36, 1994.
- [VD95] A. Vienne and L. Duriez. TASS 1.6: Ephemerides of the major saturnian satellites. *Astron. Astrophys.*, **297**:588, 1995.

- [VH98] A. Verbiscer and P. Helfenstein. Reflectance spectroscopy of icy surfaces. In B. Schmitt, C. De Bergh, and M. Festou, editors, *Solar system ices*, pages 157–197. Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [Yod95] C.F. Yoder. Astrometric and geodetic properties of Earth and the Solar System. In AGU reference Shelf 1, editor, *Global Earth physics. A handbook of physical constants*. American Geophysical Union, 1995.

Sigles et Acronymes

DE_{xxx}	Solutions du mouvement des planètes du JPL.
EMP-96	Ephemerides for Minor Planets, 1996.
FK5	Fundamental Katalog 5.
ICRF	International Celestial Reference Frame.
IERS	International Earth Rotation Service.
IRAS	Infrared Astronomical Satellite.
JPL	Jet Propulsion Laboratory.
LE_{xxx}	Solutions du mouvement de la Lune du JPL.
PA_N	angle de position du pôle nord d'un corps par rapport au pôle nord céleste.
PA_Q	angle de position de l'équateur d'intensité par rapport au pôle nord céleste.
PA_S	angle de position du point sub-solaire par rapport au pôle nord céleste.
PDS	NASA Planetary Data System
SEP	désignation du point sub-terrestre.
SSP	désignation du point sub-solaire.
TAI	Temps atomique international.
TT	Temps terrestre.
UAI	Union Astronomique Internationale.
UT1	Temps universel représentant la rotation de la Terre.
UTC	Temps universel coordonné.
VSOP_{xx}	Solutions du mouvement des planètes du Bureau des longitudes.