OBJETS DU SYSTÈME SOLAIRE HIPPARCOS

D. Hestroffer

1. Introduction

Le catalogue d'étoiles Hipparcos fournit une matérialisation dans le visible de l'ICRS (International Celestial Reference System) (Kovalevsky et al., 1997). En plus de quelques 3 millions d'étoiles, le satellite Hipparcos a observé avec succès, au cours des 41 mois de la mission, quelques objets du système solaire (principalement des astéroïdes, mais aussi des satellites naturels et des planètes principales). L'objectif principal de l'observation de ces petites planètes est de pouvoir fournir des positions de grande précision, dans le repère lié à la sphère des étoiles, afin de relier le système dynamique au système ICRS (Hipparcos). Par ailleurs, de telles observations permettent d'améliorer les éphémérides des corps observés, voire même des planètes Jupiter et Saturne dans le cas d'observations de leurs satellites. De plus les observations photométriques contiennent des informations sur la forme et la direction du pôle de rotation des astéroïdes. Les informations recueillies par le repéreur d'étoiles constituent le Catalogue Tycho, tandis que le Catalogue Hipparcos est élaboré à partir des observations de la grille principale. Les observations effectuées par le satellite sont présentées dans le paragraphe 2. Le contenu des catalogues Tycho et Hipparcos est donné dans les paragraphes 3 et 4. L'observation photométrique avec une grille de modulation placée au foyer du télescope permet de déterminer une paramétrisation de l'assombrissement centre bord de corps célestes, une application est présentée aux observations Hipparcos de la petite planète (1) Ceres au paragraphe 5. Une brève introduction de la mission GAIA est donnée au paragraphe 6.

2. Observations

Bien que le satellite ait balayé systématiquement la sphère céleste, tous les corps du système solaire n'ont pas été retenus pour la production des catalogues. Seuls des objets brillants et de diamètre apparent relativement petit pouvaient entrer dans la liste des corps a observer définie avant la mission (Input Catalogue). Ainsi 3 satellites naturels, Europe pour Jupiter, Titan et Japet pour Saturne, et 48 astéroïdes furent retenus pour la mission principale. Les éphémérides de ces astéroïdes Hipparcos, des satellites galiléens, de Titan et Japet, ainsi que de l'ensemble des planètes principales, furent intégrées au catalogue d'entrée pour des raisons techniques essentiellement (Bastian et Wagner, 1997).

Comme le satellite balayait la sphère céleste de manière régulière, aucun pointage d'objet n'a été possible. Ainsi une observation avait lieu lors du passage d'un corps céleste dans l'un des deux champs du télescope. De plus l'axe de rotation du satellite effectuait une précession autour de la direction du soleil avec un angle constant de 43°. La principale conséquence de cette loi de balayage est que les objets du système solaire ont été observés au voisinage des quadratures, i.e. lorsque l'angle de phase est

Table 1. Objets du système solaire pour le Catalogue Tycho.

Name	Photométrie	Astrométrie
Astéroïdes		
(1) Ceres	$\surd$	$\surd$
(2) Pallas	$\surd$	$\surd$
(4) Vesta	$\surd$	$\surd$
(6) Hebe	$\surd$	$\surd$
(7) Iris	$\surd$	$\surd$
Satellites		
J III–Ganymede	–	$\surd$
J IV–Callisto	–	$\surd$
S VI–Titan	$\surd$	$\surd$
Planètes principales		
Uranus	–	$\surd$
Neptune	–	$\surd$

maximal. De plus le nombre de passages et la distribution des observations au cours de la mission varient fortement d'un objet à l'autre. Finalement les observations Tycho et Hipparcos d'un même objet sont quasi-simultanées, un passage au travers du repéreur d'étoiles a lieu au plus quelques secondes avant le passage sur la grille principale.

3. Tycho

Le repéreur d'étoiles (indispensable pour la détermination de l'attitude du satellite) est constitué de bandes transparentes verticales et en chevrons, il permet ainsi de déterminer la position d'un objet dans deux directions sur la sphère céleste. La qualité et la quantité des informations recueillies par cette grille est largement suffisante pour permettre la construction du Catalogue d'étoiles Tycho. Seuls les objets du système solaire plus brillants que la magnitude V=10 et dont le diamètre apparent est inférieur à 5" ont étés retenus (*cf.* Table 1). La magnitude est donnée dans deux bandes de longueurs d'ondes, proches des magnitudes B et V du système de Johnson, pour les objets dont le diamètre apparent est inférieur à la seconde de degré. La précision relativement limitée, est de l'ordre de quelques dixièmes de magnitude. Pour des indices de couleurs $-0.2 < (B-V)_T < 1.8$, la transformation entre les deux systèmes photométriques est donnée avec suffisamment de précision par:

$$V_T - V_J = 0.09\,(B-V)_T; \qquad (B-V)_J = 0.85\,(B-V)_T.$$

Les positions sont corrigées de la parallaxe du satellite Hipparcos, de l'aberration stellaire et de la déflection des rayons lumineux par le soleil. Le catalogue donne, pour chaque passage retenu, les positions astrométriques en coordonnées équatoriales (α, δ) dans le repère de l'ICRS, ainsi que les erreurs formelles sur ces coordonnées et le coefficient de corrélation. Il est à noter que les axes principaux de l'ellipse de confiance ne sont pas orientés le long des directions Nord–Sud et Est–Ouest. Ces données sont complétées par des informations utiles pour l'analyse des plus gros objets observés. Ainsi sont fournis l'angle de position de la direction de balayage au moment de l'observation, les erreurs formelles dans cette direction des positions déterminées par chacun des systèmes de bandes, et un code indiquant si le passage a eu lieu dans la partie supérieure ou inférieure des bandes en chevrons.

4. Hipparcos

Contrairement au repéreur d'étoiles, la grille principale est constituée exclusivement de bandes verticales et ne fournit par conséquent qu'une position uni-directionnelle lors du passage d'un objet dans le champ de vue. Le signal fondamental de modulation peut être développé en séries de Fourier:

$$S(t) = I\,[1 + M\,\cos(\omega\,t + \varphi) + N\,\cos(2\omega\,t + 2\psi)]$$

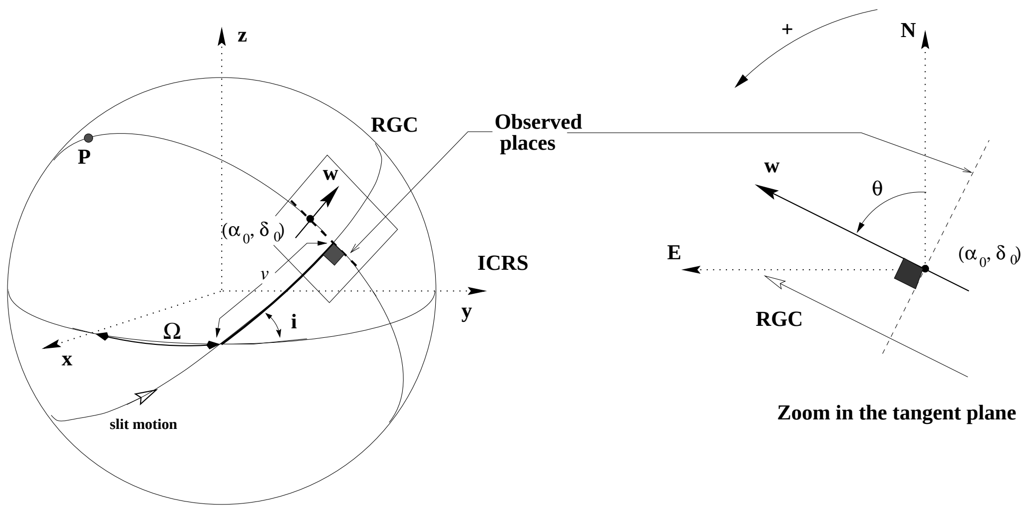

Figure 1. Point de référence et transformation sur le plan tangent.

où ω est la fréquence angulaire déterminée par la vitesse de rotation du satellite. À ce stade l'astrométrie des objets observés est déterminée de deux manières différentes par les deux consortiums de réduction des données FAST et NDAC. L'abscisse v sur un grand cercle est calculée à partir des phases de la modulation φ et ψ par FAST, et la phase φ du premier harmonique seulement par NDAC. Pour une source ponctuelle, nous avons la relation $\varphi \sim \psi$. En revanche, pour une source étendue les positions FAST et NDAC ne correspondent pas stricto-sensu au même point sur la surface de l'objet. Ainsi, contrairement aux étoiles, aucune fusion des résultats n'a été effectuée et les deux positions sont publiées.

La magnitude apparente H_{dc} est fournie, par le consortium FAST uniquement, dans le système photométrique Hipparcos Hp. Ce système possède une bande passante très étendue, sa longueur d'onde efficace est approximativement calée sur le filtre V du système de Johnson. Pour des objets du système solaire $(-0.5 < B-V < 1.5)$ nous avons la transformation entre les deux systèmes:

$$Hp - V_J \sim 0.304\,(B-V) - 0.202\,(B-V)^2 + 0.107\,(B-V)^3 - 0.045\,(B-V)^4.$$

Le catalogue photométrique est complété par la donnée d'un second estimateur de la magnitude H_{ac} (*cf.* paragraphe 5), des distances de l'astéroïde au satellite et au soleil et de l'angle de phase solaire.

Le catalogue donne, pour chaque passage retenu, les positions astrométriques en coordonnées équatoriales d'un point de référence $(\alpha_0,\, \delta_0)$ dans le repère de l'ICRS. Pour conserver le caractère strictement unidimensionnel de la mesure, ce point de référence est complété par l'angle de position θ donnant la direction sur le plan tangent de la position de l'objet (fig. 1). Par conséquent, soient $(\Delta\alpha\cos\delta,\, \Delta\delta)$ les coordonnées différentielles entre des positions calculées ou observées et les coordonnées du point de référence, seule la composante sur la direction de balayage $\mathbf{w}$ apporte l'équation de condition suivante:

$$\Delta v \sim (\,\sin\theta \quad \cos\theta\,) \cdot \begin{pmatrix} \Delta\alpha\cos\delta \\ \Delta\delta \end{pmatrix}$$

De la même manière, le déplacement du photocentre dans la direction du soleil, lorsque θ_{s} est l'angle de position du point sub-solaire, est donné par:

$$\delta v_{\mathrm{phot}} = \cos(\theta - \theta_{\mathrm{s}})\; C(i)\; \rho\; \sin(i/2)$$

où i est l'angle de phase solaire, et $C(i)$ est une fonction dépendant des propriétés de diffusion de la lumière de la surface de l'objet observé. Pour un objet dont la brillance est uniforme ou suit la loi empirique de Minnaert (de paramètre k), nous avons:

$$C_{\mathrm{uni}}(i) = \tfrac{8}{3\,\pi}\, \sin(i/2) \qquad C_{\mathrm{min}}(i) = \tfrac{2k+1}{2k+2} + o\,(i^2)$$

5. Photométrie modulée par une grille

Nous avons vu au paragraphe 4 que le catalogue photométrique contient deux estimations indépendantes de la magnitude apparente H_{dc} et H_{ac}. Il est à noter que seul H_{dc} est un estimateur sans biais et que d'une manière générale nous avons:

$$\Delta H = Hp_{\mathrm{ac}} - Hp_{\mathrm{dc}} \sim a\,\rho^2 + o\,(\rho^4) + o\,(i)$$

où $a > 0$ est un coefficient dépendant de la loi de diffusion de la lumière et ρ est le diamètre apparent. Ainsi la technique de photométrie modulée par une grille périodique permet de déterminer la taille de l'objet et son assombrissement centre-bord (Hestroffer et Mignard, 1997). Malgré la petite ouverture du télescope (30 cm), il est possible par cette technique de résoudre des objets de plus de $0.''2$ de diamètre. Le pouvoir de résolution serait plus important avec une plus grande longueur focale, ou un pas de la grille de modulation plus petit; ici la période de la grille Hipparcos est de $1.''2704$.

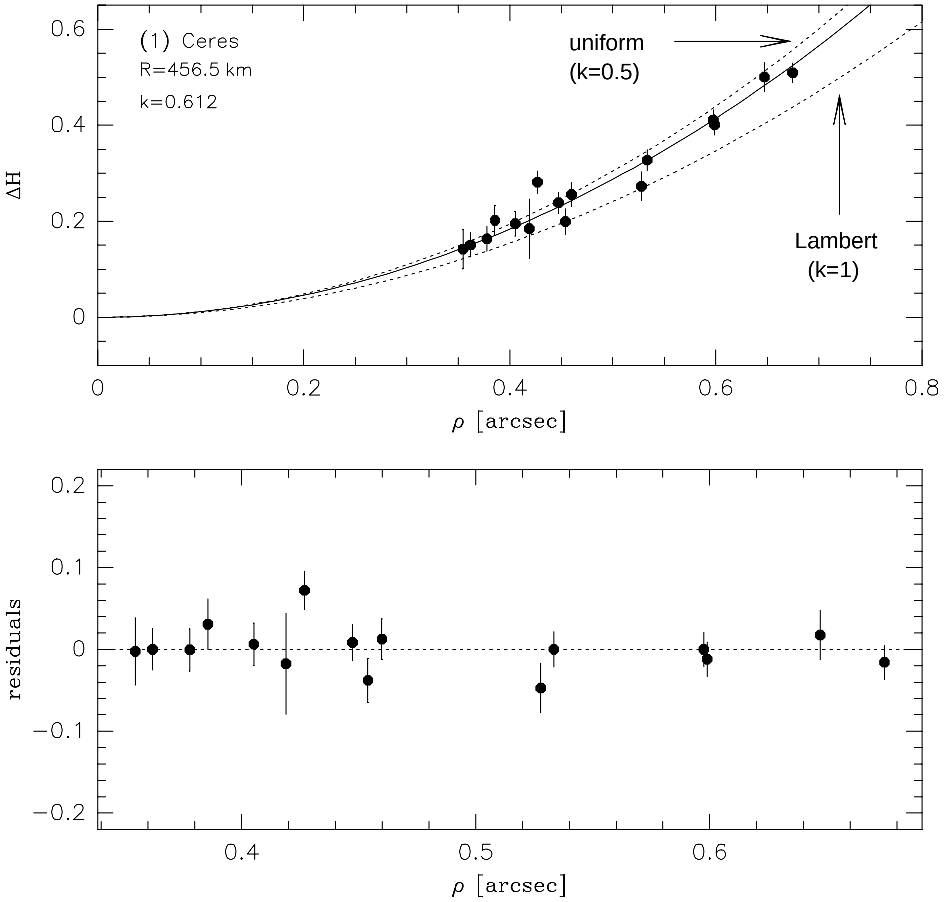

Figure 2. Biais ΔH pour les observations Hipparcos de (1) Cérès avec un rayon de 456.5 km. Chaque point est une moyenne de plusieurs passages successifs. Les lignes en pointillés correspondent aux courbes théoriques obtenues pour un objet sphérique uniformément brillant et une sphère de Lambert. La ligne continue donne le biais pour une loi de Minnaert avec k=0.61 (régression L1); les résidus sont donnés dans le panneau du bas.

Les observations Hipparcos ne permettent pas de déterminer à la fois le diamètre et la paramétrisation de la fonction d'assombrissement centre-bord, bien qu'en théorie ces deux paramètres soient accessibles par cette technique[1]. En fixant le diamètre il est néanmoins possible de déterminer le paramètre de la loi de Minnaert. Ceci ne peut s'appliquer, avec les observations Hipparcos, qu'aux objets les plus gros

[1] Rappelons que l'instrument n'a pas été conçu ni optimisé dans cet objectif

Table 2. Principales caractéristiques des mesures GAIA.

	cohérent	incohérent
principe	interférométrie grille de modulation*	tâche d'Airy CCD
magnitude limite	$V < 15 - 16$	$V < 20$
photométrie	$350 < \lambda < 800\,\mathrm{nm}$	ubvyβ + I
astrométrie		

(*) ou détection directe

en taille; un exemple est donné pour la petite planète (1) Cérès (fig. 2). Après avoir adopté le diamètre D=913 km (Tedesco, 1989), on obtient comme valeur du paramètre de Minnaert $k(\langle 18°\rangle) = 0.61$. En tenant compte du fait que le paramètre k est croissant avec l'angle de phase solaire (French et Veverka, 1983) et qu'il dépend a priori du domaine de longueur d'onde, on trouve un résultat cohérent avec ceux obtenus à partir de l'analyse de la relation magnitude–phase (Lumme et Bowell, 1981). Ainsi Cérès est un objet de brillance presque uniforme. Le résultat trouvé ici est par ailleurs en accord avec celui obtenu à partir d'observations en optique adaptative (St Pé et al., 1993), ou celui obtenu par la technique d'interférométrie des tavelures (McCarthy et al., 1994). En adoptant le diamètre effectif D=942 km obtenu par Millis et al. (1987) à partir d'une observation d'occultation d'étoile, ou D= 962 km obtenu par Drummond et Christou (1994) en optique adaptative, on obtient un paramètre de Minnaert plus élevé, impliquant un assombrissement centre-bord légèrement plus prononcé mais toujours en contradiction avec un disque de Lambert.

6. Gaia

La mission GAIA, proposée à l'Agence Spatiale Européenne pour son programme Horizon 2000+, permettra la détermination des paramètres astrométriques de plus de 50 millions d'étoiles (Lindegren et Perryman, 1996). D'autres projets d'interférométrie spatiales sont à l'étude, e.g. SIM, DIVA, LIGHT. GAIA permettra l'observation de corps célestes dans deux modes différents appelés cohérent et incohérent dont les principales caractéristiques sont rappelées dans la table 2. Notons que ces valeurs sont encore amenées à évoluer dans le futur; en particulier si la détection des franges peut se faire directement avec un réseau de cellules CCD, la magnitude limite et les précisions tant photométriques qu'astrométriques pourront être sensiblement rehaussées. La magnitude limite relativement élevée dans le mode incohérent permettra l'observation de milliers d'astéroïdes. Le nombre d'objets du système solaire observables dans le mode interférométrique sera plus restreint, en revanche, sur la durée d'un passage dans le champ de vue, les mesures des positions pourront être effectuées avec une précision meilleure que le millième de seconde de degré (Hestroffer et Morando 1995). Notons de plus qu'avec une séparation des pupilles de l'ordre de B = 1.5 m, il sera possible de résoudre, dans le domaine des longueurs d'ondes visibles, quelques centaines de corps célestes (astéroïdes et étoiles) dont la taille apparente est supérieure à environ 5 mas. Tout comme pour Hipparcos, l'observation des satellites est plus délicate et dépend fortement de l'atténuation de la lumière de la planète principale pendant les mesures.

7. Conclusion et perspectives

Le satellite Hipparcos procure des données d'ordre photométrique et astrométrique pour un total de 55 objets du système solaire (essentiellement des astéroïdes, mais aussi des satellites naturels et des planètes principales), sur une période allant de fin novembre 1989 à mi-mars 1993. Les mesures effectuées dans le cadre de la mission associée Tycho sont de précision moindre que celle de la mission principale, en revanches elles concernent des objets de taille plus importante. Tycho fournit les positions astrométriques en ascension droite et déclinaison et les magnitudes dans deux bandes proches des magnitudes B et V du système de Johnson. Hipparcos fournit des positions astrométriques uni-directionnelles, et les magnitudes dans le système photométrique Hp possédant bande passante étendue. Toutes les positions sont rattachées au repère de l'ICRS tel qu'il est matérialisé par le Catalogue Hipparcos. Les résultats sont rassemblés dans trois catalogues pour les objets du système solaire: le Catalogue Astrométrique Hipparcos, le Catalogue Photométrique Hipparcos et le Catalogue Tycho. Ces catalogues sont publiés dans le volume 10 de "The Hipparcos and Tycho Catalogues" (ESA, 1997) et en format ASCII sur CD-ROM (Volume 17). Ils sont par ailleurs accessibles sur le serveur ftp du CDS (Strasbourg).

Les observations Hipparcos procurent un complément aux observations faites à partir du sol. Les éphémérides des astéroïdes ou de planètes principales via les positions des satellites naturels peuvent être améliorées ; en particulier l'inclinaison et l'argument du noeud des orbites osculatrices des petites planètes sont déterminées avec une précision environ 5 fois meilleure grâce aux observations Hipparcos. Des informations d'ordre planétologique tel que la forme et la direction du pôle de rotation des astéroïdes à partir des données photométriques conventionnelles sont accessibles. La détermination de l'assombrissement centre bord à partir de l'analyse du déplacement du photocentre ou de la photométrie modulée par la grille principale donne des résultats similaires à ceux obtenus par l'interférométrie des tavelures ou l'optique adaptative. Le lien du système de référence dynamique au système de l'ICRS peut se faire, via les positions des petites planètes, avec une précision de l'ordre de 5 mas, donc similaire aux meilleur résultat obtenu jusqu'ici (Folkner et al, 1994).

Tant que les objets du système solaire sont concernés, il est à signaler qu'Hipparcos ne procure pas uniquement des informations précieuses par le biais des observations directes, mais aussi par la donnée de positions astrométriques de grande précision d'étoiles de référence, permettant la (re-)réduction de plaques photographiques et CCD. Hipparcos fournit aussi une solide expérience pour la mission d'interférométrie spatiale GAIA. Cette mission surpasserait de beaucoup les résultats Hipparcos de par le nombre d'objets observés et de par les précisions photométriques et astrométriques accessibles. Elle permettrait par ailleurs de déterminer pour la première fois le diamètre de nombreux astéroïdes dans le domaine du visible, et fournirait par conséquent une base de comparaison aux résultats obtenus dans l'IR par le satellite IRAS.

Références

Bastian U., Wagner K., 1997, in *The Hipparcos and Tycho Catalogues*, ESA SP-1200, Vol 4.

Drummond J., Christou J., 1994, in *Adaptive optics in astronomy*, SPIE 2201, 468.

ESA 1997, The Hipparcos and Tycho Catalogues, ESA SP-1200.

Folkner W.M., Charlot P., Finger M.H., et al., 1994, *Astron. Astrophys.*, **287**, 279.

French L.M., Veverka J., 1983, *Icarus* **54**, 38.

Hestroffer D., Mignard F., 1997, *Astron. Astrophys.*(à paraître).

Hestroffer D., Morando B., 1995, in *Future possibilities for astrometry in space*, Joint RGO–ESA workshop, 19-21, June Cambridge (UK), ESA SP–379, 41.

Kovalevsky J., Lindegren L., Perryman M.A.C, et al., 1997, *Astron. Astrophys.* **323**, 620.

Lindegren L., Perryman M.A.C, 1996, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **116**, 579.

Lumme K., Bowell E., 1981, *Astron. J.*, **86**, 1705.

McCarthy D.W., Freeman J.D., Drummond J.D., 1994, *Icarus*, **108**, 285.

Millis R.L., Wasserman L.H., Franz O.G. et al., 1987, *Icarus*, **72**, 507.

Saint-Pé O., Combes M., Rigaut F., 1993, *Icarus*, **105**, 271.

Tedesco E.F., 1989, in *Asteroids* II (R.P. Binzel, T. Gehrels, and M.S. Matthews, Eds.), p.1090, University of Arizona Press, Tucson.