COMMENT PESER UN ASTÉROIDE HIPPARCOS?

J.-F. Bange

Une cinquantaine d'astéroïdes ont été observés par le satellite astrométrique Hipparcos. L'une des utilisations possible de ces données est l'étude des passages proches entre astéroïdes. Celle-ci peut permettre de "peser" un astéroïde, c'est-à-dire d'obtenir une détermination de la valeur de sa masse. Les méthodes traditionnelles permettant une estimation directe de la masse font appel à des observations sur de longues durées, typiquement de l'ordre du siècle (le premier astéroïde a été découvert en 1801). La particularité de la méthode présentée ici est de profiter de la grande précision des observations Hipparcos pour obtenir une détermination "instantanée" de la masse, c'est-à-dire sur une courte durée (la mission se répartit sur quatre années environ). Après avoir détaillé la mise au point d'un critère de sélection pour déterminer les passages proches intéressants, j'illustrerai la méthode par l'étude du passage proche Cérès 63-Ausonia qui conduit à une estimation de la masse de Cérès.

Méthodes générales de détermination des masses des asteroïdes

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées, qui reposent toutes sur les effets gravitationnels occasionnés lors d'un passage proche entre deux petites planètes :

-Résonances sur de longues durées (Landgraf 1987, résonance Cérès-Pallas),
-Passage proche + résonance sur une longue durée (Scholl 1987, masse de 10-Hygiea; Goffin 1991),
-Succession de passages proches sur une longue durée (Williams 1992, Cérès/348-May),
-Passage proche, courte durée (Hipparcos, cette étude).

La détermination directe des masses des asteroïdes est d'un grand intérêt pour obtenir des renseignements sur la structure interne de ces objets (densités), problème que l'on rattache volontiers à l'étude des origines du système solaire. Par ailleurs, la connaissance des masses est d'un intérêt certain pour l'étude de la dynamique de ces corps et l'établissement d'éphémérides (perturbations des trajectoires). Actuellement, moins d'une dizaine de déterminations directes de masses d'asteroïdes ont été obtenues (rappelons qu'un millier d'astéroïdes ont un diamètre supérieur à 30 km).

Modèle Hipparcos

Nous rappelons ici les équations de conditions (équations aux O-C) obtenues à partir des observations Hipparcos ($\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$ et $\mathbf{C}$ sont des matrices ayant autant de lignes qu'il y a d'observations) (Bange et Bec-Borsenberger, 1997) :

- Modèle global (48 astéroïdes, 2700 observations) :

$$\mathbf{O}-\mathbf{C}=\mathbf{A}\Delta\vec{u}^0+\mathbf{B}\vec{\theta}+\mathbf{C}\Delta\vec{m}$$

- Modèle "réduit" (1 astéroïde perturbé par m^0) :

$$(\mathbf{O}-\mathbf{C})^*=(\mathbf{O}-\mathbf{C})-\mathbf{B}\vec{\theta}=\mathbf{A}\Delta\vec{u}^0+\mathbf{C}\Delta m^0$$

Table 1. DE200 : solution NDAC pour les paramètres de rotation. Valeurs en millisecondes d'arc (mas) ou millisecondes d'arc par an (mas/an).

Paramètres de rotation	θ_1	θ_2	θ_3	w_1	w_2	w_3
	mas	mas	mas	mas/an	mas/an	mas/an
	3,71	-12,18	-12,91	4,23	-9,90	16,41
	± 2,00	± 2,62	± 4,12	± 1,18	± 1,47	± 3,68

Le premier système conduit à la détermination des paramètres "globaux" entrant en ligne de compte. Le vecteur $\vec{\theta}$ représente les paramètres de rotation entre le système de référence Hipparcos (ICRS) et le système de référence dynamique (éphémérides DE200 du JPL). Le second système permet l'étude d'un couple de petites planètes donné, et la masse de la petite planète perturbatrice (m^0) apparaît ici comme une inconnue au même titre que les corrections aux éléments orbitaux de la petite planète "test" ($\Delta\vec{u}^0$). Par ailleurs, les observations Hipparcos ont été réduites par deux consortia différents (FAST et NDAC), et deux jeux d'observations ont été publiés. Cette étude est entièrement basée sur les observations de la réduction NDAC, choisie du fait d'un plus grand nombre d'observations disponibles.
Une solution pour les paramètres de rotation est donnée dans la table 1.

Quels passages proches choisir?

Un passage proche entre astéroïdes est habituellement mis en évidence par la petite valeur de la distance entre les deux objets au moment du passage proche (critère de la distance minimale). Toutefois, sur de courtes périodes, ce paramètre n'est pas déterminant en terme d'efficacité et j'ai donc mis au point un critère plus élaboré prenant en compte d'autres paramètres qui concourent à un angle de déviation élevé (critère de la déviation maximale).

Critère de la distance minimale

Les trajectoires des astéroïdes sont intégrées numériquement et par une recherche systématique, on calcule à chaque instant la distance entre deux trajectoires différentes. Lorsque celle-ci descend sous une certaine borne, on sélectionne le passage. La table 2 donne ainsi, durant la mission Hipparcos, les passages proches se produisant à une distance minimale inférieure à 0.05 unités astronomiques (ua).

Critère de la déviation maximale

Le critère précédent ne permet pas de comparer les passages proches entre eux, et ne garantit pas que tous les passages proches intéressants ont été sélectionnés. C'est pourquoi une étude un peu plus poussée de l'effet du passage proche sur la trajectoire de la petite planète perturbé s'avère nécessaire.

Table 2. Passages proches de petites planètes avant ou pendant la mission Hipparcos, avec $d_{min} \leq 0.05$ ua.

Petite planète 1	Petite planète 2	distance minimale (ua)	date (JJ)
7-Iris	88-Thisbe	0.047	2447836
18-Melpomene	97-Klotho	0.045	2448036
19-Fortuna	46-Hestia	0.035	2446592
20-Massalia	44-Nysa	0.037	2447262
63-Ausonia	89-Julia	0.046	2448020
192-Nausicaa	532-Herculina	0.037	2446666

Nous utilisons pour cela une approximation hyperbolique du mouvement relatif de deux astéroïdes lors d'un passage proche (Öpik, 1976). Le raisonnement qui suit est donc approximatif, mais l'on ne s'intéresse ici qu'à la mise au point d'un critère nous permettant de comparer les passages proches entre eux et de tester leur "efficacité" (étude semi-qualitative). L'énergie totale peut alors s'écrire :

$$W = \frac{1}{2}mv^2 + E_p \qquad avec \qquad v^2 = \frac{\sigma^2}{m^2}\left[\frac{1}{r^2} + \frac{1}{r^4}\left(\frac{dr}{d\theta}\right)^2\right]$$

d'où :

$$d\theta = -\sqrt{2m(W - E_p) - \frac{\sigma^2}{r^2}}\frac{\sigma dr}{r^2}$$

Par intégration, on en déduit l'expression de la déviation :

$$\cot\frac{\varphi}{2} = -\frac{bv_0^2}{GM_p}$$

et celle de la distance minimale :

$$r_m = \frac{GM_p}{v_0^2}\left[-1 + \frac{1}{\sin\frac{\varphi}{2}}\right]$$

d'où en éliminant le paramètre d'impact b :

$$\sin\frac{\varphi}{2} = \frac{1}{1 + \frac{r_m v_0^2}{GM_p}}$$

On en déduit que φ est grand pour $\frac{GM_p}{r_m v_0^2}$ grand.

Nouvelle sélection

Le critère précédent (dit de "déviation maximale") autorise une nouvelle sélection des passages proches entre petites planètes Hipparcos, fondée cette fois sur la valeur de la déviation attendue. Cette valeur dépend non seulement de la distance minimale lors du passage proche (r_m) mais aussi et surtout de la vitesse relative des deux astéroïdes à cet instant (v_0) et de la masse de l'astéroïde perturbateur (M_p). La nouvelle sélection de passages proches obtenue pour $d_{min} < 0.10$ ua est donnée dans la table 3.

Cérès étant la petite planète la plus massive, les valeurs du critère s'y rapportant sont les plus élevées. Le passage proche Cérès-Parthénope apparaît comme étant le plus intéressant à cet égard, mais il se produit juste à la fin de la mission Hipparcos, et son effet ne se fait donc pas encore beaucoup sentir durant la période d'observation disponible. C'est donc le passage proche Cérès-Ausonia que nous étudions ci-dessous afin d'illustrer la méthode de détermination des masses.

Table 3. Passages proches d'astéroïdes pendant (ou juste avant) la mission Hipparcos. On a retenu $d_{min} < 0,25$ ua pour les plus gros astéroïdes (Cérès, Pallas, Vesta et Hygiea) et $d_{min} < 0,10$ ua pour les autres. N_B est le nombre d'observations Hipparcos pour la petite planète perturbée (réduction NDAC).

Petite planète perturbatrice	Petite planète test	distance minimale (ua)	date (JJ)	critère de sélection	N_B (NDAC)
1-Cérès	11-Parthénope	0.206	2449522	121.732	83
1-Cérès	63-Ausonia	0.194	2447922	64.983	15
4-Vesta	28-Bellona	0.195	2446884	23.689	35
9-Métis	14-Irène	0.109	2447622	0.611	51
9-Métis	216-Kleopatra	0.080	2448056	0.399	22
10-Hygiea	88-Thisbé	0.065	2449096	92.580	36
11-Parthénope	12-Victoria	0.077	2448100	1.514	24
14-Irène	42-Isis	0.080	2448426	0.112	53
20-Massalia	44-Nysa	0.037	2447262	5.162	62
20-Massalia	129-Antigone	0.097	2446720	0.337	46
23-Thalia	42-Isis	0.073	2444962	0.063	53
23-Thalia	192-Nausicaa	0.098	2449274	0.072	33
37-Fides	63-Ausonia	0.059	2449540	0.322	15
40-Harmonia	42-Isis	0.077	2447808	0.316	53
46-Hestia	8-Flora	0,074	2449252	5.922	58
46-Hestia	19-Fortuna	0,035	2446592	15.209	30
88-Thisbé	7-Iris	0.047	2447836	3.116	36
230-Athamantis	37-Fides	0.064	2449188	0.363	40
532-Herculina	192-Nausicaa	0.037	2446666	1.177	33

Étude du passage proche Cérès/63-Ausonia

Les caractéristiques de ce passage proche sont les suivantes :

date du passage proche : JJ 2447922
distance minimale d'approche : 0.19 ua
vitesse relative à la date du passage proche : 4,87 km s^{-1}
diamètre de Cérès : 913 km
diamètre de la petite planète 63-Ausonia : 108 km
nombre d'observations de 63-Ausonia : 15 (NDAC)

Ausonia est malheureusement l'une des petites planètes les moins observées par Hipparcos!

Afin d'obtenir une estimation des perturbations attendues du fait de ce passage proche, on calcule deux trajectoires différentes pour la petite planète perturbée, la première sans tenir compte de Cérès et la seconde en tenant compte de la masse estimée de cet astéroïde (on a pris ici $M_C = 5.0\ 10^{-10} M_\odot$).

La figure 1 donne l'allure des perturbations attendues de l'orbite de la petite planète 63-Ausonia par la petite planète Cérès, ainsi que la distance entre ces deux objets au cours du temps.

Une estimation de la masse de Cérès

Les résidus d'observation sont calculés pour différentes valeurs de la masse perturbatrice (Cérès). On peut alors calculer la solution en déterminant le minimum de cette courbe (c'est l'estimation retenue pour la masse de Cérès), et en évaluant l'erreur standard sur cette valeur (Herget, 1972).

Nous obtenons ainsi $M_C = 3,65 \pm 0,88\ 10^{-10} M_\odot$.

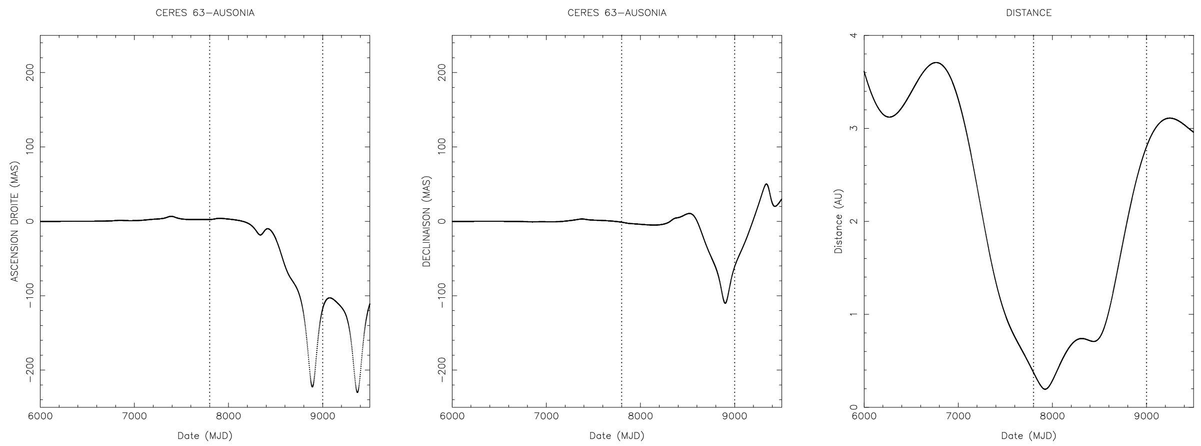

Fig. 1. Perturbations théoriques calculées de la petite planète 63-Ausonia par la petite planète Cérès (en coordonnées α et δ), et distance entre ces deux petites planètes au cours du temps.

Il reste à étudier une éventuelle perturbation de l'orbite d'Ausonia par un autre astéroïde. Pour cela, l'influence de 37-Fides et 89-Julia (deux astéroïdes qui subissent aussi un passage proche avec Ausonia juste après la mission Hipparcos) a été examinée. L'orbite d'Ausonia a donc été recalculée en tenant compte des perturbations dûes à ces deux petites planètes, mais aucune différence significative n'a été mise en évidence.

Discussion et conclusion

La valeur de la masse de Cérès obtenue est plus faible que les estimations antérieures (de $M_C = 4.3\ 10^{-10}$ à $M_C = 5.9\ 10^{-10}$) (voir par exemple Goffin, 1991, ou Williams, 1992). Cependant, il est possible que sur de longues périodes, des effets non gravitationnels viennent fausser l'estimation de la masse, auxquels l'on échappe par cette méthode. Notons aussi que la tendance récente dans l'estimation de la masse de Cérès est orientée à la baisse.
D'autre part, il est nécessaire d'affiner certains paramètres du problème ($\vec{\theta}$,...).

Enfin, la précision obtenue est limitée à cause du faible nombre d'observations disponibles et des corrélations qui peuvent exister entre les inconnues.
Pour conclure, cette méthode parait intéressante pour l'étude de quelques autres passages proches d'asteroïdes Hipparcos. Mais de toute manière, elle est amenée à se développer avec l'augmentation de la précision des observations astrométriques (projet Gaia).

Références

Bange J-F., Bec-Borsenberger A., 1997, Determination of the masses of minor planets, Symposium Hipparcos Venice 97, à paraître.

Goffin E., 1991, The Orbit of Pompeja and the mass of Ceres, *Astron. Astrophys.*, **249**, 563.

Herget P., 1972, On the determination of Planetary masses, IAU Symposium No. 45 : The Motion, Evolution of Orbits, and Origin of comets, G. A. Chebotarev et al. eds., 244.

Landgraf W., 1988, The mass of Ceres, *Astron. Astrophys.*, **191**, 161.

Öpik J. E., 1976, Interplanetary Encounters, Elsevier.

Scholl H., Schmadel L.D., Röser S., 1987, The mass of the asteroid 10 Hygiea derived from observations of 820 Academia, *Astron. Astrophys.*, **179**, 311.

Williams G. V., 1992, The mass of (1) Ceres from perturbations on (348) May, in *Asteroids, Comets, Meteors 1991*, Ed. Lunar and Planetary Institute Houston, 641.