QUELQUES PROBLÈMES À PROPOS DES OBSERVATIONS ANCIENNES DES SATELLITES DE SATURNE

A. Vienne et L. Duriez, Université de Lille

1. Introduction

Depuis quelques années, Sinclair & Taylor (1985), Taylor & Shen (1988), Harper & Taylor (1993) disent qu'il y a une "erreur systématique d'échelle" dans le système des satellites de Saturne. Cet effet supposé n'est pas apparu de manière évidente lors de la réduction de TASS aux observations. Nous montrons cela en présentant les deux représentations des mouvements utilisées, et en mettant l'accent sur leurs différences. Nous présentons ensuite les résidus des observations des satellites de Saturne faites depuis plus d'un siècle, avec ces représentations. Nous pouvons alors poser clairement le problème de l'erreur d'échelle. Quelques essais de réductions particulières des observations, nous permettent de confirmer cette "erreur d'échelle sytématique" et de conclure que celle-ci concerne uniquement les observations visuelles anciennes.

2. Représentations des mouvements utilisées

Les positions à une date donnée des satellites Mimas, Encelade, Téthys, Dioné, Rhéa, Titan, Hypérion et Japet ont été calculées avec les deux représentations des mouvements suivants :

- H−T décrit dans (Taylor 1992) pour Hypérion et dans (Harper et Taylor 1993) pour les autres satellites.
- TASS décrit dans (Duriez et Vienne 1997) pour Hypérion et dans (Vienne et Duriez 1995) pour les autres satellites.

Ces deux représentations sont basées sur les mêmes séries d'observations dont la plupart peuvent être trouvées dans le catalogue de Strugnell et Taylor (1990) et couvre plus d'un siècle, de 1874 à 1989. Cependant, les théories dont sont issues ces représentations sont différentes : Celle d'Harper et Taylor n'est pas analytique par rapport aux paramètres physiques que sont les masses et les coefficients d'aplatissement. Par contre, TASS a été construite d'une manière dynamiquement consistante, les satellites étant considérés ensemble avec toutes leurs perturbations mutuelles ; ses paramètres sont explicitement les conditions initiales, les masses des satellites et les coefficients d'aplatissement de Saturne.

Pour illustrer ce que signifie la consistance dynamique dans le cas de TASS, nous donnons dans le Tableau 1, la détermination des principaux paramètres physiques. On voit que TASS conduit à une bonne estimation de tous les paramètres. Notre détermination des coefficients d'aplatissement J_2 et J_4 s'accorde très bien avec toutes les autres. On note même que la précision obtenue est identique à celle des sondes spatiales. Notons que la masse d'Encelade n'est pas bien déterminée par les observations terrestres et que les trajectoires des sondes spatiales n'ont pas permis non plus de la déterminer. Une estimation de sa densité à partir d'une étude physique de sa forme observée par les sondes spatiales conduit à une masse de $0.114\ 10^{-6} \pm 0.003$ (Dermott 1994). Cette détermination confirme la nôtre et infirme la valeur de la masse d'Encelade que les astronomes utilisaient jusqu'alors.

3. Résidus des observations

Nous avons calculés les (o-c) de toutes les observations, une fois avec TASS, l'autre avec H−T . Le Tableau 2 donne un résultat global de ces calculs : les écarts quadratiques moyens des résidus sont trouvés entre $0''.14$ et $0''.22$, dépendant des satellites. Mais surtout, on voit que les résidus sont pratiquement les mêmes pour chacune des deux représentations. Il apparait aussi que les satellites peuvent être séparés en deux groupes : le premier (de Encelade à Titan) avec des résidus typiques de $[0''.14 - 0''.15]$, et l'autre (Mimas, Hypérion et Japet) avec des résidus plus importants.

Plus précisément, ces résidus sont pratiquement les mêmes avec les deux représentations même en considérant chaque groupe d'observations (définies principalement par le satellite observé et l'observateur). Le Tableau 3 le montre où un extrait de la distribution des résidus est donné pour les satellites Mimas, Rhéa et Hypérion et pour quelques observateurs importants.

4. Historique et présentation du problème

Ce problème concerne la détermination de la masse de Saturne à partir de l'observation de ses satellites. Le Tableau 4 donne les différentes déterminations que l'on possède actuellement.

La masse de Saturne est bien déterminée par les mesures des sondes spatiales (Campbell & Anderson 1989). À partir des observations terrestres, il est difficile d'obtenir une détermination aussi précise. La détermination de Sinclair & Taylor (1985) s'en rapproche le plus. Ils ont déterminé la masse de Saturne (avec d'autres paramètres) à partir d'une intégration numérique des mouvements de Titan, Hypérion et Japet ajustée sur les observations de ces satellites faites après 1966. En dépit de cette relativement bonne valeur, ils pensent qu'il y a une erreur d'échelle systématique dans l'observation de ces satellites. Taylor & Shen (1988) ont confirmé cette erreur d'échelle en comparant les demi-grands axes observés avec les valeurs issues des moyens mouvements à l'aide de la troisième loi de Képler. Vienne (1991) a montré qu'il pouvait y avoir une confusion entre le "demi-grand axe observé" et le rayon moyen de l'orbite. Il n'a pu trouvé quel était la correction à appliquer pour retrouver la valeur observée. Cela est probablement dû au fait que les demi-grands axes et les moyens mouvements sont deux paramètres indépendants dans la représentation de Taylor et que l'un ou les deux peuvent être affectés des défauts de la représentation.

Cela n'est pas le cas dans TASS : le moyen mouvement est ajusté (plus exactement le moyen mouvement moyen) et le demi-grand axe est une valeur calculée. Dans TASS1.6 nous avons utilisé la masse de Saturne déterminée par Campbell & Anderson, et nous avons vu que nos (o-c) sont au moins aussi bons que ceux de Harper & Taylor (1993). De plus, avec la valeur de la masse de Saturne déterminée par TASS1.5, on a remarqué que les (o-c) n'était pas significativement différents : ces résidus sont relativement peu influencés par cette valeur.

5. Tentatives d'explications

On a vu que Sinclair & Taylor n'ont utilisé que les observations faites après 1966. Or les observations faites après cette date sont pratiquement toutes des observations photographiques qui donnent : $\Delta\alpha\cos(\delta), \Delta\delta$, tandis que celles avant 1966 sont pratiquement toutes visuelles c'est-à-dire faites à l'aide d'un micromètre à fil et qui donne donc l'angle de position p et l'angle de séparation s. Nous avons donc fait des essais d'ajustement en faisant apparaître deux paramètres représentant chacun la masse de Saturne. Le premier paramètre correspond aux équations de conditions issues des mesures faites avant 1966, et le second aux mesures faites après 1966. Le résultat de cette double détermination est donné dans le bas du Tableau 4.

Tableau 1. Détermination par TASS des coefficients d'aplatissement de Saturne J_2 et J_4, des masses de Mimas (m_1), d'Encelade (m_2), de Téthys (m_3), de Dioné (m_4), de Rhéa (m_5), de Titan (m_6) et de Japet (m_8) en unités de masse de Saturne. Notre détermination est comparée avec celles de Dourneau (1987), de Harper & Taylor (1993) et de Campbell & Anderson (1990).

parameters $\times$ 10^6	Dourneau	H−T	TASS	C&A
m_1	0.0648	0.0646	0.0634	
σ	21	11	8	
m_2	0.206	0.213	0.088	
σ	55	46	21	
m_3	1.088	1.076	1.060	
σ	31	18	13	
m_4	1.954	1.916	1.963	
σ	58	36	21	
m_5			4.320	4.059
σ			380	53
m_6			236.370	236.638
σ			180	8
m_8	3.7		3.10	2.79
σ	1.7		50	8
J_2	16326	16298	16285	16298
σ	54	38	5	5
J_4	−841	−1076	−959	−915
σ	401	274	17	26

Tableau 2. Écarts quadratiques moyens des résidus obtenus pour chaque satellite avec H−T et avec TASS utilisant toutes les observations disponibles de 1874 à 1985.

	Mimas	Encelade	Téthys	Dioné	Rhéa	Titan	Hypérion	Japet
H−T	0.20	0.15	0.14	0.14	0.14	0.15	0.24	0.22
TASS	0.19	0.15	0.14	0.14	0.14	0.15	0.22	0.21

Tableau 3. Comparaison des (o-c) (en unité de 0.01 seconde d'arc) pour TASS et H−T avec les observations de Mimas, Rhéa et Hypérion. Le niveau de rejet est fixé à 2″. $N_{u/r}$ représente le rapport du nombre d'observations "utilisées/rejetées". Les séries d'observations (ou observateurs) sont issues du catalogue de Strugnell & Taylor (1990) où les réferences complètes peuvent être trouvées.

		MIMAS		RHEA		HYPERION	
observateurs	N_u / N_r	TASS	H−T	TASS	H−T	TASS	H−T
USNO (1874-1883)	637 / 24	52	52	39	39	64	80
USNO (1894-1907)	1923 / 59	51	50	23	21	53	70
Struve (1885-1892)	1650 / 1	15	14	13	12	41	79
Pascu (1973-1979)	1706 / 22	22	23	10	11	22	24
Veillet-Dourneau (1980)	728 / 0	15	17	8	8	19	19
Veillet-Dourneau (1982)	2728 / 0	19	16	9	10	15	19
Dourneau *et al.* (1981)	1196 / 0	25	24	10	11	16	18

Tableau 4. Inverse de la masse de Saturne. Les valeurs indiquées entre parathèses ont été obtenues en comparant pour chaque satellite, le moyen mouvement moyen avec la partie constante du demi-grand axe.

Campbell & Anderson (1989)	3498.790
σ	20
U.A.I.	3499.4
Sinclair & Taylor (1985)	3498.2
σ	3
Harper & Taylor (1993)	(3491)
σ	3
Dourneau (1987)	(3496)
σ	4
TASS1.5	3497.2
σ	2
essais avec TASS :	
avant 1966	3493.3
après 1966	3498.2
sans les "s"	3497.71

On y voit nettement que, dans une large mesure, ce sont les observations anciennes qui conduisent à surestimer la masse de Saturne.

Cette masse influençant la position des satellites uniquement par l'intermédiaire de la troisième loi de Képler, cela peut être un problème d'erreur systématique sur l'échelle des observations visuelles anciennes. La dernière ligne du Tableau 4 donne la valeur obtenue en omettant les équations de conditions issues des mesures de l'angle de séparation s, et confirme donc cette erreur systématique d'échelle.

Au lieu de supprimer de manière drastique les mesures de s, on peut simplement calculer la correction d'échelle relative k unique à appliquer à toutes les mesures de s, c'est-à-dire que l'on applique la transformation suivante :

$$s \longmapsto (1+k) \times s$$

Nous avons trouvé :

$$k = (9 \pm 1) \times 10^{-4}$$

Sachant que s va de quelques secondes d'arc à $700''$, la correction peut presque atteindre $0''\!.1$. Cependant les gains sur les écarts quadratiques moyens sont faibles (de l'ordre de $0''\!.02$).

Un essai plus réaliste consiste à corriger les angles s séparément pour chaque série d'observations. En effet, chaque série d'observations est caractérisée par la focale de l'instrument ou par la valeur du tour de vis du micromètre. Par exemple, Struve (1933) utilise $13''\!.2352$ pour un tour de vis. Les valeurs k_i pour les 9 premières références du catalogue de Strugnell & Taylor sont données dans le Tableau 5. Il apparaît nettement que le facteur d'échelle s'écarte peu de la valeur de 1/1000 trouvée précédemment de manière globale.

6. Conclusion

Il résulte de cette étude qu'il y a bien une "erreur d'échelle systématique" comme le répètent, depuis maintenant quelques années, les spécialistes britanniques du mouvements des satellites de Saturne (de Sinclair & Taylor 1985 jusqu'à Harper & Taylor 1993).

Cette erreur d'échelle concerne uniquement les observations micrométriques de la séparation des satellites, c'est-à-dire les observations visuelles anciennes.

Ce problème est peu apparent à la lecture des écart quadratiques moyens des (o-c) correspondants. Par contre, et c'est logique, il affecte directement la détermination de la masse de Saturne. Cette masse

Tableau 5. Correction relative k_i à appliquer à l'angle de séparation s.

observateur	N_{obs}	Période d'Observation	$k_i \times 10^4$	
USNO 1	1080	1874 à 1883	+11	±1
USNO 2	260	1883 à 1889	+10	±1
USNO 3	3720	1894 à 1907	+10	±0.4
USNO 4	2390	1908 à 1926	+6	±0.4
USNO 5	2520	1927 à 1947	+7	±0.6
Struve (Berl-Bab)	2790	1915 à 1923	+10	±0.4
Struve (Johnesb)	1700	1926 à 1928	+10	±1
Struve (Yerkes)	190	1928	−29	±9
Struve	1780	1886 à 1892	+10	±0.7

est largement surestimée par les observations anciennes. Il est à noter que même en ne retenant que les observations récentes, la masse de Saturne semble encore surestimée. Dans ce cas, l'écart est quand même bien plus faible que précédemment.

Cette étude a permis de poser le problème, mais n'a pas apporté de réponse. Il est probable que ce soit un problème d'observation ou de réduction. Or, les observateurs que nous avons cités n'ont pas observé les satellites de Saturne exclusivement. Ce problème n'a aucune raison objective d'être propre à Saturne. Nous pensons tout naturellement aux satellites de Jupiter dont les théories du mouvement et leurs observations ont été (et sont toujours) très étudiées au Bureau des Longitudes.

7. Bibliographie

Campbell J.K., Anderson J.D., 1989, Gravity field of the saturnian system from Pionneer and Voyager tracking data, *Astron. J.*, **97**, 1485–1495.

Dermott S.F., 1994, The Determination of the Mass and Mean Density of Enceladus from Its Observed Shape, *Icarus*, **109**, 241–257.

Dourneau G., 1987, Observations et études du mouvement des huit premiers satellites de Saturne, *Thèse, Bordeaux.*

Duriez L., Vienne A., 1997, Theory of motion and ephemerides of Hyperion, accepté par *Astron. Astrophys.*

Harper D., Taylor D.B., 1993, The orbits of the major satellites of Saturn, *Astron. Astrophys.*, **268**, 326–349.

Null G.W., Lau E.E., Biller E.D., Anderson J.D., 1981, Saturn gravity results obtained from Pioneer 11 tracking data and Earth based Saturn satellite data, *Astron. J.*, **86**, 456–495.

Sinclair A.T., Taylor D.B., 1985, Analysis of the orbits of Titan, Hyperion and Iapetus by numerical integration and by analytical theories, *Astron. Astrophys.*, **200**, 269.

Strugnell P.R. Taylor D.B., 1990, A catalog of ground-based observations of the eight major satellites of Saturn 1874-1989, *Astron. Astrophys. Sup. Ser.*, **83**, 289–300.

Taylor D.B., 1992, A synthetic theory for the perturbations of Titan on Hyperion, *Astron. Astrophys.*, **265**, 825–832.

Taylor D.B., Shen K.X., 1988, Analysis of astrometric observations from 1967 to 1983 of the major satellites of Saturn, *Astron. Astrophys.*, **200**, 269–278.

Vienne A., 1991, Théorie Analytique des Satellites de Saturne, *Thèse*, Lille.

Vienne A., Duriez L., 1995, TASS1.6 : Ephemerides of the major saturnian satellites, *Astron. Astrophys.*, **297**, 588–605.