

S038

**JOURNÉES SCIENTIFIQUES DU SERVICE DES CALCULS
ET DE MÉCANIQUE CÉLESTE DU BUREAU DES LONGITUDES**

- 1992 -

*Service des Calculs et de Mécanique Céleste du Bureau des Longitudes
UA 707
77, avenue Denfert-Rochereau
75014 Paris*

Février 1992

LES JOURNEES 1992

Les *journées scientifiques 1992 du Service des Calculs et de Mécanique Céleste du Bureau des Longitudes* se sont tenues les 17 et 18 février. Ces *journées* constituent la deuxième édition de cette manifestation. Le Conseil Scientifique de l'Etablissement a fixé un rythme bisannuel à cette rencontre à laquelle participe une grande majorité des chercheurs et des techniciens du Service, ainsi que les étudiants en thèse.

Ce document qui ne présente pas un caractère exhaustif ou comptable des recherches et des tâches de service entreprises dans l'Etablissement, n'est pas un rapport d'activité au sens strict. Il résume cependant de manière assez complète les différents travaux du Service depuis février 1990, date du précédent compte-rendu rédigé à l'occasion des *journées 1990*.

Le compte-rendu de cette année est plus riche que celui de la précédente manifestation, puisque son volume est en augmentation de 40 pages environ. Il existe deux raisons à cette inflation: d'une part les auteurs ont souvent souhaité développer leur contribution de manière plus approfondie, d'autre part un nombre d'étudiants plus important a participé à la rédaction du document.

J'ai regroupé sous deux intitulés distincts les contributions: activités de recherche et activités de service. Cette année, une session spéciale a été consacrée aux deux publications de l'Etablissement, la *Connaissance des Temps* et les *Ephémérides Astronomiques*. Cette session a été l'occasion de faire un état des lieux et un bilan des activités au cours des dernières années écoulées.

Le succès de notre premier forum en 1990 était de bonne augure; les *journées 1992* se sont elles aussi déroulées dans la bonne humeur, avec la participation de la majorité du personnel. Cette manifestation est maintenant inscrite dans les activités régulières du Service.

A bientôt...

Jean Chapront

Journées scientifiques 1992 du Service des Calculs et de Mécanique Céleste du Bureau des Longitudes - URA 707

oooooooooooooooooooo

Activités de recherche

- Calcul des perturbations mutuelles des quatre grosses planètes en fonction d'une seule variable angulaire. 1
Jean -Louis SIMON.
- Ephémérides des satellites naturels de Neptune, Triton, Néréïde et Proteus. 7
Claude LE GUYADER.
- Réduction relativiste des observations astronomiques - Echelles de temps. 12
Pierre BRETAGNON
- Premiers résultats d'observations de petites planètes par HIPPARCOS. 15
Bruno MORANDO
- Réduction sur un passage des données de position des petites planètes par HIPPARCOS 17
Daniel HESTROFFER
- Petites planètes HIPPARCOS - Mise à jour des éphémérides et préparation des données. 19
Annick BEC-BORSENERGER.
- Observation et théorie du satellite Thébé de Jupiter. 22
François COLAS et Duong Tuyen VU.
- Analyse d'observations d'éclipses des satellites galiléens de Jupiter. 27
William THUILLOT et Pascal DESCAMPS.
- Rapprochements et occultations entre étoiles et astéroïdes. 33
Jérôme BERTHIER.
- Les effets de surface dans la réduction des observations de phénomènes mutuels des satellites des planètes. 37
Pascal DESCAMPS.
- Dépouillement des résultats de la campagne d'observation des phénomènes mutuels des satellites galiléens de Jupiter pour l'année 1991. 43
Christian RUATTI.
- Observations des PHEMU 91 à la lunette d'Arago. 49
Bruno MORANDO.
- Le mouvement chaotique du système solaire. 52
Jacques LASKAR.
- Etude de la stabilité d'un système à deux planètes. 57
Philippe ROBUTEL.

- Relations among two formal canonical transforms. 6 0
Pierre - Vincent KOSELEFF.
- Problèmes numériques dans les intégrations à long terme du système solaire. 6 8
Frédéric JOUTEL.
- Etude de trajectoires sélénocentriques. 6 9
Daniel STEICHEN.
- Les symétries du problème des n-corps - L'origine des comètes à courte période. 7 5
Colette EDELMAN.
- Quelques travaux historiques. 7 7
Bruno MORANDO.

Activités de service

- La Connaissance des Temps, éphéméride mère du Bureau des Longitudes. 8 1
Jean CHAPRONT.
- Etat actuel et évolution future de la Connaissance des Temps. 8 5
Jean -Louis SIMON.
- Ephémérides des satellites naturels des planètes. 8 8
Jean -Eudes ARLOT.
- La Connaissance des Temps - Edition - Diffusion. 9 2
Liliane BERGEAL.
- Les éphémérides astronomiques - Edition et programmes. 9 7
Patrick ROCHER.
- Service minitel. 9 9
Germaine SATRE.
- Renseignements 1990 -1991. 1 0 0
Liliane BERGEAL.
- Projet de centre de données sur les satellites naturels de planètes. 1 0 2
Jean -Eudes ARLOT.
- La diffusion informatisée des éphémérides. 1 0 7
Patrick ROCHER.

Annexe

- Quelques "petits trucs" à savoir pour une meilleure utilisation du VAX, et surtout un super confort pour les utilisateurs. 1 1 3
Nicole BARON.

oooooooooooooooooooo

ACTIVITES DE RECHERCHE

CALCUL DES PERTURBATIONS MUTUELLES DES QUATRE GROSSES PLANÈTES EN FONCTION D'UNE SEULE VARIABLE ANGULAIRE

Jean-Louis Simon

1. Introduction

L'objet de ce travail est la construction d'une théorie des quatre grosses planètes Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune répondant à deux objectifs : garder une grande précision sur plusieurs milliers d'années et obtenir une représentation de leur mouvement avec des développements en puissance du temps nettement plus convergents que dans les théories classiques, en particulier pour Jupiter et Saturne. Pour cela nous avons adapté la méthode mise au point sur le problème simplifié Soleil-Jupiter-Saturne par Simon et Joutel (1988) et calculé les perturbations planétaires, par analyse harmonique en utilisant un processus itératif, sous forme de séries de Poisson d'une seule variable angulaire.

2. Représentation des perturbations planétaires en fonction d'un seul argument angulaire

2.1 Notations

Soit une planète P de masse m . Les variables représentant le mouvement de P sont les variables elliptiques classiques : $a, \lambda, e, \varpi, \gamma = \sin \frac{i}{2}, \Omega, k = e \cos \varpi, h = e \sin \varpi, q = \gamma \cos \varpi, p = \gamma \sin \varpi$. Nous désignerons par x l'une quelconque de ces variables et par x^0 la constante d'intégration de x . Nous notons $\bar{\lambda}$ la longitude moyenne définie par $\bar{\lambda} = \lambda^0 + Nt$ où λ^0 désigne la constante d'intégration de la longitude moyenne λ et où N est le moyen mouvement moyen de la planète, f étant la constante de la gravitation. Enfin, nous numérotions de 5 à 8 les quatre grosses planètes prises dans l'ordre Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune.

2.2 Théorie à variations séculaires

La théorie que nous présentons est à variations séculaires. Dans ce type de théorie les solutions sont développées sous forme de séries de Poisson :

$$x = x^0 + x^1 t + x^2 t^2 + \dots + x^j t^j + S_0 + t S_1 + \dots + t^j S_j \quad (1)$$

où t représente le temps, $x^0, x^1, x^2, \dots, x^j$ sont des coefficients numériques et S_0, S_1, \dots, S_j sont des séries de Fourier. Dans les théories classiques des quatre grosses planètes, les arguments ϕ de ces séries de Fourier sont des combinaisons linéaires des quatre longitudes moyennes moyennes :

$$\phi = r_5 \bar{\lambda}_5 + r_6 \bar{\lambda}_6 + r_7 \bar{\lambda}_7 + r_8 \bar{\lambda}_8 \quad (2)$$

où r_5, r_6, r_7, r_8 sont des entiers relatifs. Les séries de Fourier S_q des expressions (1) ont donc la forme :
 $S_q = \sum_{\phi} \{A_{\phi} \cos \phi + B_{\phi} \sin \phi\}$.

Ici nous développons les perturbations planétaires en séries de Poisson dont les arguments sont des multiples d'un seul argument de base μ . Les séries S_q auront la forme :

$$S_q = \sum_r \{A_r \cos r\mu + B_r \sin r\mu\}, \quad (3)$$

où r est un entier positif ou nul tel que : $0 \leq r \leq M$. L'argument de base μ est une fonction linéaire du temps relié aux longitudes moyennes moyennes par des relations du type :

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}_5 - \lambda_5^0 &= N_5 t = q_5 \mu + \varepsilon_5 t \\ \bar{\lambda}_6 - \lambda_6^0 &= N_6 t = q_6 \mu + \varepsilon_6 t \\ \bar{\lambda}_7 - \lambda_7^0 &= N_7 t = q_7 \mu + \varepsilon_7 t \\ \bar{\lambda}_8 - \lambda_8^0 &= N_8 t = q_8 \mu + \varepsilon_8 t, \end{aligned} \quad (4)$$

où q_5, q_6, q_7, q_8 sont des entiers fixés et où $\varepsilon_5, \varepsilon_6, \varepsilon_7, \varepsilon_8$ sont des quantités petites devant les moyens mouvements moyens N_5, N_6, N_7, N_8 des quatre planètes.

2.3 Choix de cette représentation

Nous avons choisi cette représentation pour deux raisons :

— Nous allons pouvoir construire notre solution par analyse harmonique à un argument ce qui permettra une grande *simplification des problèmes numériques* que l'on rencontre dans la mise en œuvre des algorithmes de calcul.

— Un choix judicieux de l'argument de base μ doit permettre une *convergence plus rapide des développements liés aux perturbations mutuelles de Jupiter et Saturne*. Pour comprendre les raisons de cette meilleure convergence il faut se rappeler comment on peut déduire les développements issus des théories à variations séculaires de ceux issus des théories générales. Dans une théorie générale du couple Jupiter-Saturne, les perturbations des longitudes moyennes ont la forme :

$$\Delta\lambda = \sum_{\Phi} A_{\Phi} \sin \Phi. \quad (5)$$

où $\Phi = \phi + \sum_{j=5}^6 l_j \psi_j + \sum_{j=5}^6 m_j \theta_j$, avec :

$$\begin{aligned} \phi &= r_5 \bar{\lambda}_5 + r_6 \bar{\lambda}_6 \quad (\text{partie à courte période}) \\ \psi_j &= g_j t + \beta_j; \quad \theta_j = s_j t + \delta_j \quad (\text{partie à longue période}) \end{aligned}$$

où les fréquences g_j, s_j des arguments à longue période ψ_j, θ_j sont petites devant les moyens mouvements moyens N_5, N_6

En développant les longues périodes par rapport au temps, on retrouve les développements des théories à variations séculaires :

$$\sum_{\Phi} A_{\Phi} \sin \Phi = \sum_i t^i \{A_i \cos \phi + B_i \sin \phi\} \quad (6)$$

On sait (Duriez, 1979 ou Bretagnon et Simon, 1990) que, dans une théorie générale du couple Jupiter-Saturne ce sont des arguments Φ du type $\phi - (r_5 + r_6)\psi_6$ qui donnent la partie la plus importante des développements des théories à variations séculaires obtenus par (6). Les perturbations (5) correspondant à un argument à courte période ϕ donné se développent donc approximativement comme des quantités de la forme :

$$\Delta\lambda \approx A \sin[\phi - (r_5 + r_6)\beta_6 - (r_5 + r_6)g_6 t], \quad (7)$$

où $g_6 = 0,14$ radian par milliers d'années. Si l'on arrive à définir, à l'aide des relations (4), un argument de base μ pour lequel on ait, quels que soient r_5 et r_6 :

$$r_5(\bar{\lambda}_5 - \lambda_5^0) + r_6(\bar{\lambda}_6 - \lambda_6^0) - (r_5 + r_6)\omega t = p\mu \quad (8)$$

où p est un entier et où ω est "voisin" de 0,14 radian par millier d'années, on pourra espérer obtenir des développements en séries de Poisson de μ nettement plus convergents que les développements classiques en fonction des longitudes moyennes moyennes. Ceci nous conduit finalement à chercher un argument de base vérifiant :

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}_5 - \lambda_5^0 &= N_5 t = q_5 \mu + \varepsilon t \\ \bar{\lambda}_6 - \lambda_6^0 &= N_6 t = q_6 \mu + \varepsilon t, \end{aligned} \quad (9)$$

où ε est "voisin" de 0,14 radian par millier d'années.

3. Construction de la solution (Simon et al., 1992)

3.1 Choix de l'argument de base

Nous avons recherché un argument de base permettant d'obtenir des développements plus convergents que ceux des théories classiques pour Jupiter et Saturne et des développements proches de ceux des théories classiques pour Uranus et Neptune. Par ailleurs nous souhaitons que sa période soit 4 fois environ celle de la grande inégalité Uranus-Neptune $\bar{\lambda}_7 - 2\bar{\lambda}_8$ de période 4233 ans. Nous avons choisi :

$$\mu = \frac{(N_5 - N_6)t}{880} = 0,3595 t \quad (10)$$

μ a une période de 17 485 ans. Les quantités $\varepsilon_5, \varepsilon_6, \varepsilon_7, \varepsilon_8$ des relations (4) sont, exprimées en radian par millier d'années, : $\varepsilon_5 = \varepsilon_6 = 0,094$, $\varepsilon_7 = -0,002$, $\varepsilon_8 = 0,022$ Les deux grandes inégalités Jupiter-Saturne et Uranus-Neptune sont reliées à μ par :

$$\begin{aligned} 5(\bar{\lambda}_6 - \lambda_6^0) - 2(\bar{\lambda}_5 - \lambda_5^0) &= 19\mu + 0,2824 t \\ 2(\bar{\lambda}_8 - \lambda_8^0) - (\bar{\lambda}_7 - \lambda_7^0) &= 4\mu + 0,0463 t, \end{aligned}$$

les coefficients du temps étant en radian par millier d'années.

3.2 Intégration des équations

Le problème traité est le problème théorique Soleil-Jupiter-Saturne-Uranus-Neptune. Nos équations sont les équations de Lagrange. Notre méthode est celle de Simon et Joutel (1988). C'est une méthode itérative basée sur l'analyse harmonique qui permet de développer nos solutions en séries de Poisson de μ :

$$x = x^0 + x^1 t + x^2 t^2 + \dots + x^j t^j + S_0(\mu) + t S_1(\mu) + \dots + t^j S_j(\mu), \quad (11)$$

où les séries de Fourier S_q ont la forme (3) et sont calculées en utilisant les algorithmes de transformée de Fourier rapide mis au point par Joutel (1990).

Nous souhaitons construire une théorie de grande précision sur l'intervalle $J2000 - 6000, J2000 + 6000$ ce qui nous a conduit à effectuer une soixantaine d'itérations, les développements (11) étant calculés avec $j = 10$ pour Jupiter et Saturne, $j = 8$ pour Uranus et Neptune. Nous notons JSUN1 notre solution.

4. Résultats

4.1 Description des solutions pour Jupiter et Saturne

Les développements en puissance du temps sont plus rapidement convergents dans JSUN1 que dans les théories classiques. Les tableaux 1 et 2 illustrent ce résultat. Le tableau 1 donne, pour la longitude de Saturne,

l'amplitude et l'argument du terme le plus important des séries S_i pour notre solution et pour la théorie de référence JASON84 (Simon et Bretagnon, 1984). On constate, par exemple, que l'amplitude du plus gros terme de S_{10} est 90 fois plus petite dans JSUN1 que dans JASON84. Le tableau 2 donne le nombre de termes des deux solutions pour l'ensemble des variables des deux planètes, pour différentes précision de troncature. À niveau de troncature égal, notre solution est plus compacte que JASON84 d'un facteur compris entre 1,5 et 2,3.

Tableau 1. – Développement en puissance du temps de la longitude moyenne de Saturne dans notre solution JSUN1 et dans la solution JASON84 : argument et amplitude du terme donnant la plus grosse contribution au bout de 6 000 ans. L'unité est la seconde de degré.

	JSUN1		JASON84	
S_0	2 911,7	(19 μ)	2 911,6	(2 $\bar{\lambda}_5 - 5\bar{\lambda}_6$)
S_1	2 174,7	(19 μ)	6 971,5	(2 $\bar{\lambda}_5 - 5\bar{\lambda}_6$)
S_2	1 076,4	(19 μ)	8 630,5	(2 $\bar{\lambda}_5 - 5\bar{\lambda}_6$)
S_3	371,4	(19 μ)	7 137,2	(2 $\bar{\lambda}_5 - 5\bar{\lambda}_6$)
S_4	121,0	(19 μ)	4 490,4	(2 $\bar{\lambda}_5 - 5\bar{\lambda}_6$)
S_5	59,9	(19 μ)	2 314,3	(2 $\bar{\lambda}_5 - 5\bar{\lambda}_6$)
S_6	13,8	(19 μ)	1 041,6	(2 $\bar{\lambda}_5 - 5\bar{\lambda}_6$)
S_7	6,6	(19 μ)	433,1	(2 $\bar{\lambda}_5 - 5\bar{\lambda}_6$)
S_8	4,6	(19 μ)	248,7	(4 $\bar{\lambda}_5 - 10\bar{\lambda}_6$)
S_9	1,8	(19 μ)	146,4	(4 $\bar{\lambda}_5 - 10\bar{\lambda}_6$)
S_{10}	0,9	(19 μ)	80,1	(4 $\bar{\lambda}_5 - 10\bar{\lambda}_6$)

Tableau 2. – Jupiter et Saturne : Nombre de termes des solutions JSUN1 (N1) et JASON84 (N2) donnant des contributions supérieures à différentes précisions de troncature.

	Précision de troncature	Planète	N1	N2	N2/N1
σ_1	$\left\{ \begin{array}{l} 0,0002'' \text{ sur } 1\,000 \text{ ans} \\ \text{ou } 0,04'' \text{ sur } 6\,000 \text{ ans} \end{array} \right\}$	Jupiter	4 456	6 535	1,47
		Saturne	9 427	15 099	1,60
σ_2	$\left\{ \begin{array}{l} 0,001'' \text{ sur } 1\,000 \text{ ans} \\ \text{ou } 0,1'' \text{ sur } 6\,000 \text{ ans} \end{array} \right\}$	Jupiter	2 331	3 705	1,59
		Saturne	4 873	8 714	1,79
σ_3	$\left\{ \begin{array}{l} 0,1'' \text{ sur } 1\,000 \text{ ans} \\ \text{ou } 1'' \text{ sur } 6\,000 \text{ ans} \end{array} \right\}$	Jupiter	401	680	1,70
		Saturne	795	1 804	2,27

4.2 Description des solutions pour Uranus et Neptune

Une comparaison de JSUN1 à la théorie de référence VSOP87 (Bretagnon et Francou, 1988) montre que, pour Uranus et Neptune, les deux théories se comportent à peu près de la même façon, pour la convergence des développements comme pour le nombre de termes des solutions.

4.3 Précision de la solution

Nous avons estimé la précision de notre solution en comparant à des intégrations numériques internes sur l'intervalle de temps $J2000 - 6000, J2000 + 6000$, notre solution JSUN1 et les deux théories de référence VSOP87 et JASON84. Nous avons effectué les intégrations numériques à l'aide des programmes de Schubart

et Stumpff (1966) et de Le Guyader (1990).

Le tableau 3 donne les écarts maximaux sur des intervalles de temps de 1000, 2000, 4000 et 6000 ans de part et d'autre de J2000 pour les quatre longitudes moyennes. Le nombre entre parenthèses, à droite de chaque écart, donne l'ordre de grandeur du gain en précision par rapport aux théories de référence. On voit que les écarts sont petits et que les gains en précision sont grands. Globalement nos résidus ne dépassent pas 0,03'' sur $J2000 - 1000$, $J2000 + 1000$ et 2,5'' sur $J2000 - 6000$, $J2000 + 6000$ et on peut considérer que notre solution est plus précise que les théories actuelles d'un facteur compris entre 5 et 10.

Tableau 3. – Écarts maximaux entre notre solution JSUN1 et une intégration numérique interne sur des intervalles de temps de 1000, 2000, 4000 et 6000 ans de part et d'autre de J2000 pour les longitudes moyennes de Jupiter (λ_5), Saturne (λ_6), Uranus (λ_7) et Neptune (λ_8). L'unité est la seconde de degré. Les nombres entre parenthèses donnent l'ordre de grandeur du gain en précision par rapport aux théories de référence VSOP87 ou JASON84.

	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8
-1000,+1000	0,019 (13)	0,033 (7)	0,010 (4)	0,006 (7)
-2000,+2000	0,100 (9)	0,200 (19)	0,122 (3)	0,021 (12)
-4000,+4000	0,630 (3)	1,580 (8)	1,450 (4)	0,150 (11)
-6000,+6000	0,750 (8)	1,580 (20)	2,190 (16)	2,500 (2)

Le tableau 4 donne, pour les mêmes variables et les mêmes intervalles de temps que le tableau 3, les écarts maximaux entre notre solution tronquée à 0,1'' sur 1000 ans ou 1'' sur 6000 ans et une intégration numérique interne. La précision de cette solution très compacte est, pour les quatre planètes, de l'ordre de 1'' sur -1000,+1000 et de l'ordre de 15'' sur -6000,+6000 ce qui est meilleur que la précision des tables de Bretagnon et Simon (1986) donnant le mouvement des planètes sur un grand intervalle de temps. Il est intéressant de noter que pour Saturne, par exemple, la précision de cette solution compacte est meilleure que celle de la théorie de référence JASON84 pour les intervalles de temps extérieurs à $J2000 - 2000$, $J2000 + 2000$ et ceci avec, environ, 20 fois moins de termes.

Tableau 4. – Solution issue de JSUN1 tronquée à 0,1 sur 1000 ans ou 1'' sur 6000 ans : écarts avec une intégration numérique interne, sur des intervalles de temps de 1000, 2000, 4000 et 6000 ans de part et d'autre de J2000, pour les longitudes moyennes des quatre grosses planètes. L'unité est la seconde de degré.

Intervalle de temps	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8
-1000,+1000	0,7	1,1	1,1	1,1
-2000,+2000	2,5	2,3	2,5	1,3
-4000,+4000	3,0	4,3	4,2	3,0
-6000,+6000	11,5	14,2	7,8	8,9

4.4 Discussion

Les gains en précision pour Uranus et Neptune sont essentiellement dus au fait que nous avons effectué un grand nombre d'itérations. Pour Jupiter et Saturne, en revanche, une bonne part des progrès réalisés est due au choix de la représentation à un argument. Celle-ci permet en effet non seulement une représentation plus compacte et plus précise des perturbations mutuelles Jupiter-Saturne mais aussi une représentation bien plus convergente des développements correspondant à quelques moyennes courtes périodes comme, par exemple,

l'argument $-4\bar{\lambda}_5 + 11\bar{\lambda}_6 - 3\bar{\lambda}_7$ (période 1975 ans) pour lequel les développements avaient été estimés d'une manière approchée lors de la construction de JASON84. Dans notre solution cet argument est représenté par l'argument 7μ ; le tableau 5 concerne le développement en puissance du temps de la longitude moyenne de Saturne pour l'argument 7μ dans notre solution et pour l'argument $-4\bar{\lambda}_5 + 11\bar{\lambda}_6 - 3\bar{\lambda}_7$ dans JASON84. On voit qu'à partir de la série S_2 , les amplitudes ne dépassent pas quelques secondes de degré au bout de 6000 ans dans notre solution, alors qu'ils atteignent 109'', pour la série S_3 , dans JASON84. On conçoit que la précision de nos développements soit bien meilleure.

Tableau 5. – Longitude moyenne de Saturne : développement en puissance du temps correspondant à l'argument 7μ dans notre solution JSUN1 et à l'argument $-4\bar{\lambda}_5 + 11\bar{\lambda}_6 - 3\bar{\lambda}_7$ dans la solution JASON84. Les valeurs des amplitudes, au bout de 6 000 ans, sont données en secondes de degré.

	7μ (JSUN1)	$-4\bar{\lambda}_5 + 11\bar{\lambda}_6 + 3\bar{\lambda}_7$ (JASON84)
S_0	11,16	10,86
S_1	10,61	42,86
S_2	2,69	83,83
S_3	2,82	109,36
S_4	2,59	106,99
S_5	4,13	83,74
S_6	3,30	54,62
S_7	2,56	30,54
S_8	1,08	14,94
S_9	0,47	6,50
S_{10}	0	2,54

5. Conclusion

Les objectifs que nous nous étions fixés au départ de ce travail sont atteints : nos solutions sont nettement plus précises que les meilleures théories analytiques actuelles et elles sont aussi plus compactes pour Jupiter et Saturne. Il nous reste maintenant à introduire les perturbations par les planètes inférieures et les perturbations relativistes pour obtenir une solution *réelle* du mouvement des quatre grosses planètes. Nous comptons construire à la fois des solutions de grande précision sur l'intervalle $J2000-6000$, $J2000+6000$ et des solutions compactes à l'usage des historiens des sciences.

Bibliographie

- Bretagnon, P., Simon, J.L.: 1986, Planetary Programs and Tables from -4000 to $+2800$, Willmann-Bell, Inc.
 Bretagnon, P., Francou, G.: 1988, A & A **202**, 309
 Bretagnon, P., Simon, J.L.: 1990, A & A **239**, 387
 Duriez, L.: 1979, Approche d'une théorie générale planétaire en variables elliptiques héliocentriques, Thèse, Lille
 Joutel, F.: 1990, Amélioration par analyse harmonique de la théorie des quatre grosses planètes, Thèse, Paris
 Le Guyader, Cl.: 1990, *Note Sci. Techn. Bureau Long. S025*
 Schubart, J., Stumpff, P.: 1966, *Veröff. Astron. Rechen-Inst. Heidelberg* **18**
 Simon, J.L., Bretagnon, P.: 1984, A & A **138**, 169
 Simon, J.L., Joutel, F.: 1988, A & A **205**, 328
 Simon, J.L., Joutel, F., Bretagnon, P.: 1992, A & A , soumis

EPHEMERIDES des SATELLITES NATURELS de NEPTUNE

TRITON, NEREIDE et PROTEUS

C. Le Guyader

I. Introduction

Triton est le premier satellite naturel de Neptune découvert en 1847 par Lassell, Nereide le second en 1949 par Kuiper; récemment, en Août 1989, la sonde Voyager 2 détectait six nouveaux satellites dont le plus important d'entre eux Proteus.

Triton est un satellite massif de faible excentricité, son mouvement très incliné sur l'équateur de Neptune est rapide et rétrograde; Néréide est lui très excentrique et son mouvement relativement lent s'effectue dans le sens direct. Enfin, les résultats obtenus à partir Voyager 2 nous montre que Proteus a une excentricité également très faible, que son mouvement est direct, très proche de l'équateur de Neptune et encore plus rapide que celui de Triton.

Nous avons intégré numériquement ces mouvements de satellites (séparément ou simultanément), en utilisant pour commencer des conditions initiales données; nous avons comparé nos résultats avec des observations relativement récentes et pour finir montré les influences respectives de Triton et du Soleil sur Néréide.

Nous nous proposons ensuite de calculer de nouvelles conditions initiales de ces satellites à l'aide d'observations récentes de F. Colas, et de débiter ainsi la construction définitive de leurs éphémérides.

II. Conditions initiales et intégrations numériques

Les conditions initiales que nous avons utilisées sont celles qui ont servi à Jacobson (1990) pour construire par intégration numérique les éphémérides des satellites de Neptune en vue de guider la trajectoire de Voyager 2.

Dans cette intégration l'ensemble des perturbations y est représenté par un corps fictif situé au barycentre du système solaire et ayant pour masse la somme des masses du Soleil et de toutes les planètes intérieures à Neptune.

Ces conditions initiales centrées au barycentre du système de Neptune et par rapport à l'équateur et équinoxe moyens 1950.0 ont alors été ramenés dans l'écliptique et équinoxe J2000 et par rapport au centre de Neptune.

Le tableau 1 ci après nous donne les éléments osculateurs des deux satellites à l'instant initial d'intégration, le tableau 2 le système des masses utilisées.

Tableau 1. Eléments osculateurs de Triton et Néréide par rapport à l'écliptique et équinoxe J2000. Instant initial d'intégration JJ = 2447080.5 TE

Eléments	Triton	Néréide
a	0.00237 UA	0.036 UA
e	0.00039 rd	0.755 rd
i	131°031	4°975
Ω	212°653	317°413
ω	87°774	298°615
λ	41°607	329°946
n	61°168 /J	1°004 /J
τ (JJ)	2447078.847	2447006.871

On y constate que Triton a une excentricité faible et que son mouvement rétrograde a une période d'environ 6 jours autour de la planète; à l'inverse Néréide est lui très excentrique et son mouvement direct s'effectue en à peu près une année.

Tableau 2. Masses du système planétaire de Neptune(Jacobson) masse du Soleil = 1 masse de Néréide = 0

Corps	Inverses des Masses
Neptune	19454.07350006618
Triton	21457144.38156831
Corps fictif	0.9987113336288693
Neptune+Triton	19436.45148340755

Nous avons donc effectué l'intégration de ce système des 4 corps entre le 12 Octobre 1987 0h TE et le 1 Mai 1949 0h TE en utilisant la méthode décrite par Le Guyader(1990) et qui donne les solutions recherchées, développées en séries de Taylor d'ordres élevés. Nous avons ensuite remplacé le corps fictif par l'ensemble du Soleil et de toutes les autres planètes, Pluton comprise, cette fois séparés, et refait la même intégration avec ce système de 11 corps.

Les comparaisons effectuées ensuite entre ces deux intégrations, sur les longitudes du noeud et du périastre de Néréide, et sur sa longitude moyenne nous donnent des résultats identiques à quelques millièmes de degré près comme nous le montre le tableau 3 suivant.

Tableau 3. Longitudes comparées de Néréide à la fin de chacune des deux intégrations JJ=2433037.5 TE

Eléments	Intégration 4 corps	Intégration 11 corps
Ω	326°5853	326°5847
ω	289°0676	289°0682
λ	332°3923	332°3933

Quant à celles de Triton leurs différences sont encore moindres. Notre modèle, très proche de celui de Jacobson nous a donc permis, dans un premier stade, à étudier le système des satellites de Neptune.

III. Comparaisons des résultats aux observations

Les coordonnées différentielles qui seront utilisées pour le calcul des O-C sont pour Néréide issues de 44 observations de Van Biesbroek entre Mai 1949 et Juin 1969 d'une part, puis 6 autres entre Mai 1977 et Avril 1981 d'autre part, issues respectivement des observations de Shellus, Mulholland et Veillet. Pour Triton Harrington(1988) nous a fourni 56 coordonnées différentielles entre Août 1984 et Août 1986. Nos calculs n'ont été effectués jusqu'à présent, que par rapport au barycentre Terre-Lune et en ne tenant compte que de la correction du temps de lumière. Nous en avons néanmoins obtenu les résultats suivants par rapport à des observations récentes. Nous les résumons dans les tableaux ci dessous.

Tableau 4. Observations-calculs pour Néréide entre Mai 1977 et Avril 1981

Dates TE	Observateurs	(O-C)
1977 Mai 22.3065	Shelus	$\Delta\alpha \cos\delta = -0''349$ $\Delta\delta = -0''346$
1978 Juillet 3.2755	Mulholland	$\Delta\alpha \cos\delta = 0''155$ $\Delta\delta = 0''259$
1981 Avril 6.3355	Veillet	$\Delta\alpha \cos\delta = 0''025$ $\Delta\delta = 0''000$
1981 Avril 6.3355	Veillet	$\Delta\alpha \cos\delta = -0''155$ $\Delta\delta = -0''058$
1981 Avril 11.3615	Veillet	$\Delta\alpha \cos\delta = 0''001$ $\Delta\delta = 0''039$
1981 Avril 11.3545	Veillet	$\Delta\alpha \cos\delta = -0''206$ $\Delta\delta = -0''112$

Tableau 5. Observations-calculs pour Triton extraits entre Août 1984 et Août 1986 (tous les autres (O-C) sont aussi inférieurs à 1")

Dates TU	Observateur	(O-C)
1984 Août 29.1334	Harrington	$\Delta\alpha \cos\delta = -0''694$ $\Delta\delta = 0''445$
1984 Août 29.1460	Harrington	$\Delta\alpha \cos\delta = 0''711$ $\Delta\delta = 0''459$
1985 Juin 8.3549	Harrington	$\Delta\alpha \cos\delta = 0''765$ $\Delta\delta = -0''508$
1985 Août 13.1792	Harrington	$\Delta\alpha \cos\delta = 0''008$ $\Delta\delta = -0''775$
1986 Juin 19.3165	Harrington	$\Delta\alpha \cos\delta = 0''524$ $\Delta\delta = -0''199$
1986 Août 16.1769	Harrington	$\Delta\alpha \cos\delta = 0''207$ $\Delta\delta = 0''260$

IV. Influences respectives du Soleil et de Triton sur Néréide

Nous avons intégré le mouvement de Néréide en le perturbant successivement par le Soleil, par Triton et par l'ensemble de ces deux corps réunis; nous avons ensuite calculé les éléments osculateurs de Néréide à chaque date d'enregistrement(68), puis calculé la droite des moindres carrés pour chacun de ces éléments et considéré l'amplitude maximale relative de leurs perturbations périodiques et séculaires sur l'intervalle d'intégration considéré.

Tableau 6. Importances des perturbations dues à Triton sur Néréide, pendant une période de Triton, entre le 6 Octobre 1987 TE et le 12 Octobre 1987 TE. Inverse de la masse de Triton = 21457144.38156831

Eléments	Perturbations de Néréide pendant une période de Triton	
	Périodiques	Séculaires
a	-0.000158 UA	-0.000098 UA
e	470"427	-425"282
i	81"215	- 29"139
Ω	13681"857	2985"548
ω	-12554"789	-3139"938
λ	-1382"980	

Tableau 7. Importances comparées des perturbations périodiques dues au Soleil, à Triton et à ces deux corps réunis sur Néréide, entre le 1 Mai 1949 TE et le 12 Octobre 1987 TE. Inverse de la masse de Triton = 21457144.38156831

Eléments	Perturbations périodiques de Néréide par		
	Soleil	Triton	Triton+Soleil
a	0.0000043 UA	0.00069 UA	0.000689 UA
e	496"168	926"505	1131"984
i	-44"472	800"533	792"923
Ω	351"149	13933"365	14628"947
ω	-845"570	-13799"195	-15098"624
λ	830"499	2101"900	2908"084

Tableau 8. Importances comparées des perturbations séculaires dues au Soleil, à Triton et à ces deux corps réunis sur Néréide, entre le 1 Mai 1949 TE et le 12 Octobre 1987 TE. Inverse de la masse de Triton = 21457144.38156831

Eléments	Perturbations séculaires de Néréide par		
	Soleil	Triton	Triton+Soleil
a	0.0000016 UA	0.000066 UA	0.000063 UA
e	-0.0077 rd	0.00047 rd	-0.0074 rd
i	-0°134	0°151	0°025
Ω	3°657	-0°413	3°292
ω	-4°547	0°412	-4°178

La sonde Voyager 2 nous ayant fourni une nouvelle masse de Triton nous avons pour finir calculé par exemple les perturbations périodiques correspondantes de Néréide et les avons comparées aux anciennes dans le tableau 9 ci contre.

Tableau 9. Importances comparées des perturbations périodiques de Néréide dues à Triton avec sa masse calculée d'après Voyager 2 , entre le 1 Mai 1949 TE et le 12 Octobre 1987 TE. Inverse de la masse de Triton = 92944475.76880403

Eléments	Perturbations périodiques de Néréide par	
	Triton(21457144.381)	Triton(92944475.768)
a	0.00069 UA	0.00015 UA
e	926"505	211"068
i	800"533	185"527
Ω	13933"365	3103"453
ω	-13799"195	-3077"955
λ	2101"900	485"581

V. Conclusion

Tous ces résultats nous ont montré l'importance qu'il y a pour les autres satellites de Neptune à tenir compte de l'influence de Triton, nous avons donc commencé à construire son éphéméride définitive.

Pour cela nous utiliserons les observations de F.Colas pour calculer de nouvelles conditions initiales d'intégration et utiliserons également le système de référence de Jacobson afin de tenir compte de l'aplatissement de Neptune; Nous ajusterons pour finir nos résultats à toutes les observations anciennes de Triton.

Partant de cette nouvelle éphéméride de Triton nous pourrons alors débiter celle de Néréide et continuer à étudier le mouvement de Proteus découvert récemment par Voyager 2.

VI. Références

- Jacobson., R A. 1990, Astronomy and Astrophys. 231,241
Le Guyader, C. 1990, Note Technique S025
Walker, R L., Harrington,R L. 1988, Astron.J. 95,5

REDUCTION RELATIVISTE DES OBSERVATIONS ASTRONOMIQUES. ECHELLES DE TEMPS.

Pierre Bretagnon

1. Introduction

Le but de cet article est la construction d'expressions analytiques pour les quantités nécessaires à la réduction relativiste des observations astronomiques. Pour cela, nous utilisons la théorie relativiste des systèmes de référence astronomiques de Brumberg et Kopejkin (1989) et de Brumberg (1991) et les théories planétaires et lunaires du Bureau des Longitudes (Bretagnon et Francou, 1988, Chapront-Touzé et Chapront, 1983).

Nous allons tout d'abord définir les notations liées aux trois systèmes de référence utilisés. Dans le Système de Référence Barycentrique (BRS), les coordonnées sont notées $x^0, x^i, i = 1, 2, 3$ et $t = x^0/c$ est le Temps Coordonnée Barycentrique (*TCB*). De même, dans le Système de Référence Géocentrique (GRS), les coordonnées sont notées w^0, w^i et $u = w^0/c$ est le Temps Coordonnée Géocentrique (*TCG*) et, dans le Système de Référence Topocentrique (TRS), les coordonnées sont notées z^0, z^i et $\tau = z^0/c$ est le temps propre de l'observateur.

2. Transformation BRS-GRS

Les relations entre les coordonnées de temps et d'espace sont données dans Brumberg (1991) :

$$u = t - c^{-2}[S(t) + v_E^k r_E^k] + \dots, \quad (1)$$

$$w^i = r_E^i + c^{-2}[\frac{1}{2}v_E^i v_E^k + qF^{ik}(t) + D^{ik}(t)]r_E^k + \dots \quad (2)$$

avec :

$$r_E^i = x^i - x_E^i,$$

$$\dot{S} = \frac{1}{2}v_E^2 + \bar{U}_E(x_E),$$

$$D^{ik} = \delta_{ik}\bar{U}_E(x_E),$$

$$\dot{F}^{ik} = \frac{3}{2}(v_E^i a_E^k - v_E^k a_E^i) - 2[\bar{U}_{E,k}^i(x_E) - \bar{U}_{E,i}^k(x_E)] + 2(v_E^i Q_k - v_E^k Q_i)$$

$q = 0$ correspond au cas cinématique, $q = 1$ au cas dynamique. v_E^i et a_E^i représentent la vitesse et l'accélération, respectivement, de la Terre dans BRS.

Le potentiel extérieur $\bar{U}_E(x_E)$ et le vecteur potentiel \bar{U}_E^i sont donnés par :

$$\bar{U}_E(x_E) = \sum_{A \neq E} \frac{GM_A}{r_{EA}},$$

$$\bar{U}_E^i = \sum_{A \neq E} \frac{GM_A}{r_A} v_A^i.$$

Enfin, on définit la fonction vectorielle F^i à partir de la fonction antisymétrique F^{ik} :

$$F^{ik} = \epsilon_{ikj} F^j,$$

$$F^{ik} r_E^k = -(F \times r_E)^i$$

avec :

$$\dot{F}^i = \sum_{A \neq E} \frac{GM_A}{r_{EA}^3} \left[-\frac{3}{2} (v_E \times r_{EA})^i + 2(v_A \times r_{EA})^i \right]$$

On trouve pour la partie séculaire de la fonction F^i :

$$\begin{aligned} c^{-2} F^1 &= 0'', 955 \cdot 10^{-8} t & + 19'', 544 \cdot 10^{-10} t^2 & + 0'', 602 \cdot 10^{-12} t^3 \\ c^{-2} F^2 &= 0'', 119 \cdot 10^{-8} t & + 217'', 843 \cdot 10^{-10} t^2 & - 0'', 159 \cdot 10^{-12} t^3 \\ c^{-2} F^3 &= 0'', 019 \cdot 198 \cdot 830 t & - 1'', 349 \cdot 10^{-10} t^2 & - 0'', 018 \cdot 10^{-12} t^3 \end{aligned}$$

où t est le temps compté en années juliennes à partir de J2000.

La fonction $c^{-2} F$ contient des termes périodiques dont le plus important a une amplitude de $0'', 153 \cdot 10^{-3}$. Ces termes sont donnés dans Brumberg et al (1991). Le terme principal de F est la précession géodésique p_g que l'on peut tronquer, comme la constante de la précession, à $10^{-6}''$ par an :

$$p_g = 0'', 019 \cdot 199.$$

Les temps coordonnés barycentriques (t) et géocentrique (u) sont liés par une relation dont la partie séculaire est la suivante :

$$t = u + a_1 t + a_2 t^2 \quad (3)$$

avec :

$$a_1 = 1,480 \cdot 826 \cdot 85 \cdot 10^{-8}$$

$$a_2 = -1,2881 \cdot 10^{-20} \text{ an}^{-1}$$

où t est mesuré en années juliennes à partir de J2000. Les termes périodiques de cette relation ont été calculés à une précision de l'ordre de la nanoseconde par Fairhead et Bretagnon (1990). Le terme le plus important a une amplitude de $1656,675 \mu s$.

3. Transformation GRS-TRS

La transformation entre les coordonnées de GRS et les coordonnées de TRS a la forme :

$$\tau = u - c^{-2} [V(u) + v_T^k (w^k - w_T^k)] + \dots,$$

$$z^i = w^i - w_T^i + c^{-2} \left[\frac{1}{2} v_T^i v_T^k + q_T \mathcal{F}^{ik}(u) + \mathcal{D}^{ik}(u) \right] (w^k - w_T^k) + \dots$$

Ecrivons la fonction $V(u)$ sous la forme :

$$V(u) = V^* u + V_P(u) \quad (4)$$

où $V^* u$ représente la partie séculaire et $V_P(u)$ la partie périodique. La partie principale de $\dot{V}(u)$ est :

$$\frac{GM_E}{\rho}$$

où M_E représente la masse de la Terre et ρ le rayon terrestre. On obtient :

$$\left\langle c^{-2} \frac{GM_E}{\rho} \right\rangle = 0,069 \cdot 535 \cdot 10^{-10}$$

4. Echelles de temps

Rassemblons les expressions reliant les différentes échelles de temps. TCG est lié au temps propre τ de l'observateur par :

$$\begin{aligned} u = TCG &= \tau + c^{-2}V^*u + c^{-2}V_P(u) \\ &= \tau + 0,069\,635\,10^{-8}u + c^{-2}V_P(u) \end{aligned} \quad (5)$$

Relation entre TCB et TCG :

$$\begin{aligned} t = TCB &= u + 1,480\,826\,85\,10^{-8}t - 1,2881\,10^{-20}t^2 \\ &+ 1656,^s\,675\,10^{-6}\sin(6,240\,054 + 6,283\,075\,850t) \\ &+ \dots \end{aligned}$$

Introduisons maintenant le temps atomique international (TAI), le temps terrestre (TT) et le temps barycentrique (TB). A partir des relations (4) et (5), on peut écrire :

$$\tau + c^{-2}V_P(u) = u - c^{-2}V^*u.$$

TAI est alors la réalisation de la valeur moyenne de $\tau + c^{-2}V_P(u)$:

$$TAI = \langle \tau + c^{-2}V_P(u) \rangle$$

TT , défini par :

$$\begin{aligned} TT &= u - c^{-2}V^*u = \tau + c^{-2}V_P(u) \\ &= u - 0,069\,635\,10^{-8}u \end{aligned}$$

ne présente donc pas de dérive par rapport à TAI .

Enfin, TB est égal à TCB corrigé d'un terme proportionnel au temps afin de ne pas dériver par rapport à TAI :

$$TB = TCB - (0,069\,635\,10^{-8} + 1,480\,827\,10^{-8})t \quad (6)$$

Des formules (1), (3), (5) et (6), on tire :

$$TB = \tau + c^{-2}V_P(u) + [c^{-2}S(t)]_P - 1,2881\,10^{-20}t^2$$

où $[c^{-2}S(t)]_P$ est la partie périodique de $c^{-2}S(t)$.

REFERENCES

- Bretagnon, P., Francou, G., 1988, Planetary theories in rectangular and spherical variables. VSOP87 solutions. *Astron. Astrophys.* **202**, 309
- Brumberg, V. A. and Kopejkin, S. M., 1989, Relativistic Theory of Celestial Reference Frames In: *Reference Frames* ed. J. Kovalevsky, I. I. Mueller and B. Kolaczek (Dordrecht : Kluwer) p. 115
- Brumberg, V. A., 1991, *Essential Relativistic Celestial Mechanics* (Bristol : Hilger)
- Brumberg, V. A., Bretagnon, P., Francou, G., 1991, Analytical algorithms of relativistic reduction of astronomical observations. In: *Journées 1991, Systèmes de référence spatio-temporels* ed. N. Capitaine, Observatoire de Paris, p. 141
- Chapront-Touzé, M., Chapront, J., 1983, The lunar ephemeris ELP2000. *Astron. Astrophys.* **124**, 50
- Fairhead, L. and Bretagnon, P., 1990, An Analytical Formula for the Time Transformation TB-TT. *Astron. Astrophys.* **229**, 240

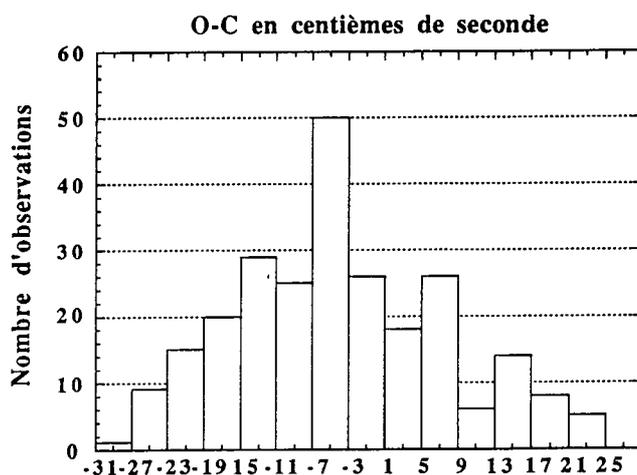
PREMIERS RESULTATS D'OBSERVATIONS DE PETITES PLANETES PAR HIPPARCOS

Bruno Morando

Données utilisées

Le satellite Hipparcos a été lancé en août 1989. Après les incidents survenus au lancement il a pu commencer à observer dès la fin de l'année. En ce qui concerne les petites planètes nous avons pu disposer de données provenant de différentes sources.

D'une part H. Schrijver du Laboratoire for Space Research d'Utrecht (Pays Bas) nous a envoyé les fichiers abcisses sur les grands cercles de référence (RGC) et les données de définition de ces RGC qu'il a obtenues au cours de la réduction dite "Quick look". Ces données ne sont pas formatées exactement comme le prévoit nos programmes qui ont été adaptés aux fichiers définis par le consortium de réduction des données FAST. Par ailleurs nous avons reçu de FAST des données partielles concernant des observations faites entre septembre 1989 et juillet 1991. Ces observations couvraient 60 RGC. L'origine des abcisses sur un RGC est voisine du nœud ascendant de ce RGC sur l'écliptique $J2000.0$, mais les corrections pour passer de ce nœud à l'origine n'étaient connues que pour 48 RGC. Le nombre de petites planètes observées était de 18, observées sur 15 RGC, seules deux petites planètes figuraient sur deux RGC différents.



Une autre bande reçue de FAST en décembre 1991 contenait l'ensemble des observations effectuées pendant la période définie ci-dessus. Trente-huit petites planètes ont été observées dont une (Lætitia) sur sept RGC et trois sur cinq RGC. L'exploitation complète de cette bande n'a pas pu être faite avant ces Journées mais on a calculé les O-C des abcisses sur les RGC de toutes les observations. L'histogramme ci-joint montre que ces O-C se regroupent

autour de la valeur $0''4$. Pour deux observations on a trouvé des O-C supérieurs à $1''2$, il s'agit manifestement d'erreurs de pas de grille. Elles ont été signalées à FAST.

Réduction des données

Certains détails du traitement des données en vue de leur réduction seront donnés plus loin par D. Hestroffer. Résumons ici l'ensemble des opérations.

On lit sur le fichier MPAG les abscisses observées et l'on remplace les observations faites pendant un passage (en général sur huit T4 différents) par une donnée unique (voir D. Hestroffer). On calcule pour chaque date d'observation la position et la vitesse héliocentriques de la Terre, ainsi que la position et la vitesse géocentriques du satellite Hipparcos et les coordonnées géocentriques de la planète. On fait les corrections d'aberration dues au mouvement du satellite. On corrige l'abscisse apparente de la planète, ainsi obtenue, de la correction d'origine du RGC lue dans le fichier SYS. On calcule ensuite les O-C pour chaque observation. On en déduit des améliorations de l'orbite de la planète qui conduisent à réitérer le processus précédent.

Comme on le verra plus loin la correction due au déplacement du photocentre par rapport au centre provoquée par l'effet de phase, semble négligeable dans presque tous les cas compte tenu des valeurs des rms sur les abscisses observées

REDUCTION SUR UN PASSAGE DES DONNEES DE POSITION DES PETITES PETITES PLANETES PAR HIPPARCOS

Daniel Hestroffer

Introduction :

Du fait de la rotation spine du satellite, une petite planète traverse le champ du télescope en environ 19 secondes. De plus l'observation ne se fait pas en continu et une position moyenne de la planète sur la grille de modulation est donnée tout les T4 (un T4 = 32/15 s.) Rappelons que seule l'abscisse sur un cercle de balayage (cercle perpendiculaire aux barreaux de la grille) est mesurée. Afin de diminuer le nombre de données, cette position est projetée sur un GCR (Grand cercle de référence, il correspond à la moyenne d'environ cinq cercles de balayages).

Nous avons donc en général huit observations régulièrement espacées λ par passage.

Réduction sur un passage :

La projection sur le cercle de balayage de la vitesse relative de la planète par rapport à la grille est pratiquement constante pendant le passage, nous pouvons donc écrire:

$$\lambda_{\text{obs}} = \lambda_0 + d\lambda/dt \cdot t \quad \text{où } t \text{ est compté en T4}$$

$$d\lambda/dt = \text{cte}$$

On effectue une régression linéaire sur le nuage de points $(\lambda_k ; t_k \text{ } k = 1..8)$ obtenu lors d'un passage. De plus, il est à noter qu'il est inutile de déterminer la pente de cette droite, en effet nous avons:

$$d\lambda/dt \approx d\lambda/dt_{\text{théo}}$$

où:

$$d\lambda/dt_{\text{théo}} \text{ est la valeur théorique obtenue à partir des éphémérides}$$

il ne reste qu'un seul paramètre à déterminer: $\langle \lambda_0 \rangle$, et finalement nous obtenons, sur un GCR, une abscisse moyenne au temps médian du passage t_m

$$\lambda_m = \langle \lambda_0 \rangle + d\lambda/dt_{\text{théo}} \cdot t_m$$

L'erreur moyenne d'une donnée d'observation brute est:

$$\sigma_{\text{hipp}} \approx 30 \pm 10 \text{ mas (milli arc second)}$$

l'erreur moyenne après réduction sur un passage est environ:

$$\sigma \approx \frac{1}{\sqrt{8}} \cdot \sigma_{\text{hipp}} = 0,35 \cdot \sigma_{\text{hipp}}$$

Déplacement du photocentre:

La position observée correspond au photocentre, alors que la position calculée correspond au centre de gravité; ainsi l'écart O-C entre la position observée et calculée provient de deux sources:

- une erreur sur les éphémérides,
- un décalage du photocentre dû à l'effet de phase.

Le décalage du photocentre est proportionnel au diamètre apparent de la petite planète donc faible en général, de plus nous ne pouvons considérer que sa projection sur le cercle de balayage (voir la figure).

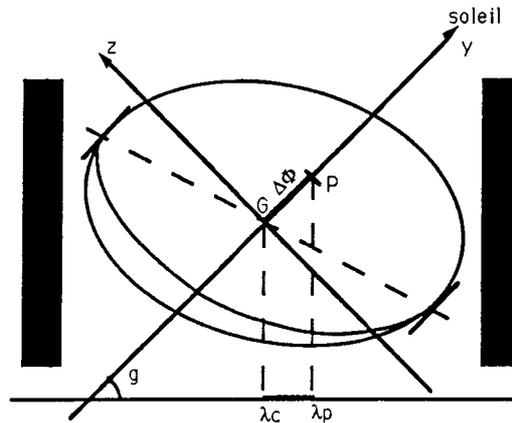


figure: décalage du photocentre sur la grille

L'effet sur la mesure est:

$$\lambda_p - \lambda_c = \Delta\Phi \cdot \cos g$$

Ce décalage est donc, pour la plupart des planètes du programme, négligeable par rapport au bruit des mesures; seules les planètes Ceres, Pallas et Vesta peuvent présenter un décalage sensible. Les tableaux ci-dessous donnent la valeur de ce décalage sur la grille pour les planètes Ceres et Pallas lorsque'elles sont à la quadrature ($g = 47^\circ$ ou $g = 133^\circ$) et pour des lois de diffusion de la lumière uniforme et de Lambert. Ces lois de diffusion empiriques sont intéressantes car elles donnent une borne inférieure et supérieure du déplacement du photocentre.

CERES	Déplacement (mas)
Loi uniforme	5
Loi de Lambert	25

PALLAS	Déplacement (mas)
Loi uniforme	2,5
Loi de Lambert	12,5

tableaux: déplacement du photocentre sur la grille

Conclusion :

Nous n'avons pas détaillé ici la méthode à suivre pour positionner le système de référence dynamique (équinoxe et écliptique d'une date) par rapport au catalogue Hipparcos, toutefois la "précision du rattachement" est proportionnelle à l'erreur moyenne d'une observation (ou d'une observation normale). Ainsi, en diminuant le bruit des mesures d'environ 65% nous améliorons sensiblement la position du système de référence dynamique.

L'étude des effets systématiques dus à l'effet de phase pour les planètes Ceres, Pallas et Vesta peut permettre de déterminer la loi de diffusion de la lumière sur la surface de la planète ou à défaut d'écarter celles qui ne correspondent pas à la réalité.

PETITES PLANETES HIPPARCOS, MISE A JOUR DES EPHEMERIDES ET PREPARATION DES DONNEES

A. Bec-Borsenberger

Mise à jour des éphémérides

Pour assurer leur observation par le satellite Hipparcos, les positions des corps doivent être connues à mieux qu'une seconde de degré, aussi dans le cas des 48 petites planètes, les positions sont fournies par des éphémérides qui sont mises à jour chaque année. Ces éphémérides donnent, dans le système de référence J2000, la longitude et la longitude géocentrique écliptique ainsi que la distance et la magnitude. Les coordonnées sont fournies sous forme de coefficients de Tchebycheff. Calculées par intégration numérique à partir des éléments orbitaux, ces éphémérides ont été ajustées sur des observations rassemblées au M.P.C. et pour la période plus récente (depuis 1984) sur des observations réalisées dans ce but. Ces éphémérides sont ensuite extrapolées pour la période relative à la campagne Hipparcos (1989-1993). Pour maintenir la précision des éphémérides extrapolées dans la limite de 1", la campagne d'observations méridiennes à Bordeaux et à La Palma se poursuit. J'ai donc procédé depuis le lancement du satellite à 2 ajustements. Pour celui de 1991 j'ai inclus les observations réalisées à La Palma en 1988 et 1989 et celles réalisées à Bordeaux en 1990. Après ce dernier ajustement tous les "r.m.s." sont inférieurs à 1" (tableau 1), sauf celui relatif à la petite planète 216-Kleopatra qui s'élève à 1,04". Néanmoins, pour cette petite planète, pour laquelle nous ne disposons avant 1984 que de très peu d'observations, nous pouvons remarquer que la valeur du "r.m.s." relativement aux observations récentes de Bordeaux et La Palma sont de 0.27" et 0.22" en α et en δ respectivement (tableau 2).

Ces éphémérides ont été envoyées à l'ESA en juin 1991.

Par ailleurs la publication du Catalogue d'entrée principal (concernant les étoiles) est en cours. En annexe, les éphémérides des petites planètes sont publiées dans Sup. A&A; les éphémérides 1991 ont été publiées en décembre 1990 et les éphémérides 1992 sont en cours de publication. Comme dans le catalogue principal, les éphémérides et les éléments orbitaux y sont donnés dans les deux systèmes de référence : 1950.0 et J2000.

Exploitation des observations de petites planètes par Hipparcos.

Le Catalogue d'entrée d'Hipparcos a été établi à partir de propositions faites en 1982 par la communauté astronomique. Aussi les observations réalisées par le satellite seront distribuées aux proposant dès qu'elles seront disponibles (donc après la fin de la campagne d'observation). En outre, l'ESA a demandé aux membres des consortiums de soumettre de nouvelles propositions ou de reformuler leurs propres propositions : les proposant internes auront la disposition des données préliminaires, dans la mesure où il n'y a pas remise en cause des droits des premiers proposant. C'est donc sur la reformulation de la proposition faite en 1982 que je suis en train de travailler avec mes co-proposants dans une équipe élargie pour prendre en compte le travail réalisé au cours de ces dix dernières années. L'équipe comprend donc, en plus de la mienne, la participation de H. Scholl (Nice), M. Rapaport et Y. Requième (Bordeaux), M. Bougard (Paris), L.V. Morrison (Cambridge). Nous étudions la possibilité d'utiliser les observations des 48 petites planètes pour déterminer l'équateur, l'équinoxe et une éventuelle rotation du système de référence Hipparcos par rapport au système de référence dynamique, de déterminer certaines des masses de petites planètes, enfin d'établir le lien entre le système de référence Hipparcos et l'équinoxe FK5. Cette nouvelle proposition doit être soumise à l'ESA en mai 1992.

Num IAU	period of observations	nobs	rms (")	Num IAU	period of observations	nobs	rms (")
1	1950 1990	3754	0.69	30	1951 1990	427	0.95
2	1950 1989	4055	0.67	31	1951 1990	384	0.74
3	1950 1990	3609	0.70	37	1950 1990	272	0.86
4	1950 1989	4093	0.83	39	1950 1990	2374	0.67
5	1950 1989	548	0.88	40	1950 1990	2071	0.62
6	1950 1990	2526	0.61	42	1950 1990	325	0.79
7	1950 1990	2272	0.60	44	1951 1990	588	0.72
8	1950 1990	699	0.90	51	1950 1990	2356	0.62
9	1950 1989	650	0.70	63	1950 1990	406	0.91
10	1950 1990	917	0.78	88	1950 1990	393	0.73
11	1950 1989	2262	0.62	115	1950 1990	377	0.98
12	1950 1989	445	0.80	129	1951 1990	385	0.74
13	1951 1989	367	0.77	192	1950 1990	379	0.86
14	1950 1990	771	0.73	196	1950 1990	383	0.71
15	1950 1989	626	0.69	216	1950 1989	295	1.04
16	1950 1989	684	0.71	230	1950 1990	418	0.69
18	1950 1990	2415	0.55	324	1950 1989	354	0.74
19	1950 1989	495	0.96	349	1950 1990	490	0.72
20	1951 1990	568	0.90	354	1950 1989	473	0.88
22	1950 1989	411	0.92	451	1951 1989	272	0.83
23	1950 1990	317	0.80	471	1950 1989	357	0.93
27	1950 1989	557	0.79	511	1950 1990	401	0.83
28	1951 1990	414	0.76	532	1950 1990	684	0.65
29	1950 1990	531	0.72	704	1950 1990	608	0.59

Table 1.

Nombre d'observations et écarts-types pour les 48 petites planètes Hipparcos (ajustement 1991).

Table 2. Bordeaux and la Palma observations since 1984

N	obs		σ		N	obs		σ	
	B	LP	A	D		B	LP	A	D
			"	"				"	"
1	101	242	0.22	0.22	40	48	192	0.27	0.26
2	103	286	0.20	0.27	42	43	128	0.31	0.28
3	90	196	0.28	0.26	44	66	210	0.26	0.25
4	104	204	0.30	0.26	45	51	113	0.29	0.33
5	60	135	0.29	0.33	46	29	95	0.39	0.46
6	74	212	0.19	0.21	49	31	40	0.35	0.35
7	61	223	0.27	0.25	51	64	183	0.25	0.26
8	61	235	0.28	0.24	52	91	166	0.30	0.26
9	131	186	0.25	0.26	63	81	116	0.26	0.29
10	77	231	0.25	0.26	65	27	50	0.47	0.44
11	131	171	0.20	0.29	68	51	143	0.29	0.35
12	74	150	0.31	0.28	88	53	167	0.32	0.29
13	36	193	0.32	0.38	89	50	99	0.25	0.33
14	100	184	0.27	0.28	97	43	96	0.30	0.40
15	87	227	0.22	0.24	115	58	103	0.27	0.37
16	70	209	0.23	0.26	129	73	115	0.24	0.29
17	76	112	0.37	0.40	171	7	20	0.61	0.69
18	105	202	0.28	0.33	192	71	129	0.29	0.29
19	65	165	0.27	0.27	196	68	161	0.25	0.35
20	66	199	0.25	0.29	216	29	73	0.27	0.22
21	85	104	0.24	0.26	230	93	133	0.22	0.23
22	44	146	0.32	0.31	324	28	151	0.32	0.35
23	50	123	0.25	0.27	337	28	76	0.39	0.49
24	40	110	0.41	0.37	349	91	188	0.26	0.32
27	102	169	0.28	0.27	354	69	109	0.24	0.33
28	84	159	0.29	0.27	423	35	118	0.31	0.31
29	68	212	0.24	0.28	451	29	117	0.27	0.38
30	90	130	0.22	0.29	471	33	156	0.29	0.36
31	55	108	0.35	0.38	511	41	130	0.30	0.27
37	46	87	0.30	0.33	532	54	137	0.25	0.27
39	57	146	0.27	0.26	704	59	153	0.24	0.34

OBSERVATION ET THEORIE DU SATELLITE THEBE DE JUPITER

F. Colas et D. T. Vu

Introduction

Le quatorzième satellite de Jupiter, Thébé, a été découvert et observé par les sondes spatiales Voyager en 1979. C'est un petit satellite, de 75 km de diamètre, en mouvement sur une orbite proche de la planète. Le plan de cette orbite est faiblement incliné sur le plan de l'équateur jovien et le demi-grand axe de l'orbite est un peu supérieur à trois fois le rayon équatorial de la planète. Thébé a un mouvement rapide, une révolution orbitale dure 16 heures 11 minutes. La perturbation due à la forme d'ellipsoïde aplati de la planète est importante, les harmoniques du potentiel concernées donnent à son orbite un mouvement rapide, le grand axe de l'orbite fait un tour en 289 jours et la précession du noeud de l'orbite sur l'équateur de Jupiter a une vitesse du même ordre. Sa masse relative à celle de Jupiter n'est que 4.10^{-10} , c'est à dire cent mille fois plus faible que la moyenne de celles des satellites galiléens. Sa magnitude 15.6 est le grand obstacle pour les tentatives d'observation depuis la Terre puisque Thébé se trouve près d'un objet très brillant qui est Jupiter lui-même de magnitude -1.6. La figure 1 montre l'environnement proche de Thébé dans le système jovien quand les orbites des corps concernés sont projetées sur l'équateur de Jupiter.

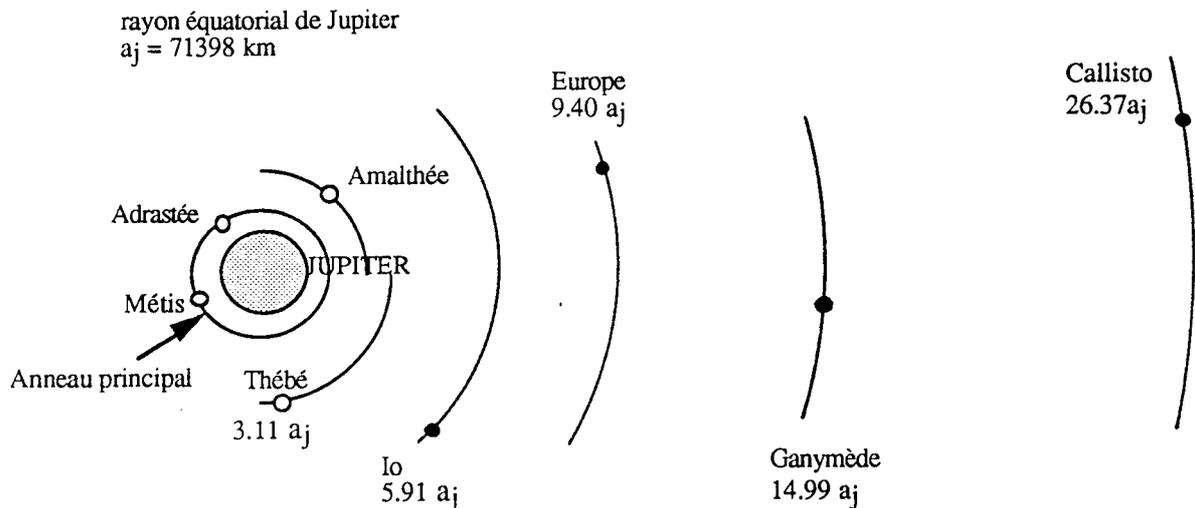


Figure 1

La figure 2 montre la zone utile d'observation d'un des côtés de la planète. Sur cette figure l'orbite de Thébé est une ellipse très aplatie, le champ d'observation de la caméra CCD utilisée au Télescope de 1 mètre de l'observatoire du Pic du Midi est de l'ordre de 60 secondes de degré, est représenté par le rectangle de la figure. L'observation se fait souvent aux périodes d'opposition de Jupiter et du Soleil par rapport à la Terre. Le diamètre de la planète est alors proche de 47 secondes de degré. Du fait que l'image de Jupiter est énorme dans le champ, on doit repérer la position de Thébé par rapport à un ou plusieurs satellites galiléens qui se trouvent à proximité au moment de l'observation, ces derniers évoluent également sur des orbites très aplaties vues de la Terre. Dans les images obtenues, les satellites galiléens, utilisés comme repères, ne sont pas des objets ponctuels mais occupent certaines surfaces dont il faudra déterminer les centres avec précision lors de la réduction. On peut voir qu'il est inutile de prendre des clichés quand on n'arrive pas à mettre au moins un objet de référence dans le champ; la présence

d'Amalthée seul dans le champ comme objet de référence peut être intéressante mais le résultat ne sera pas immédiat car la position de ce dernier est moins bien connue que celles des satellites galiléens.

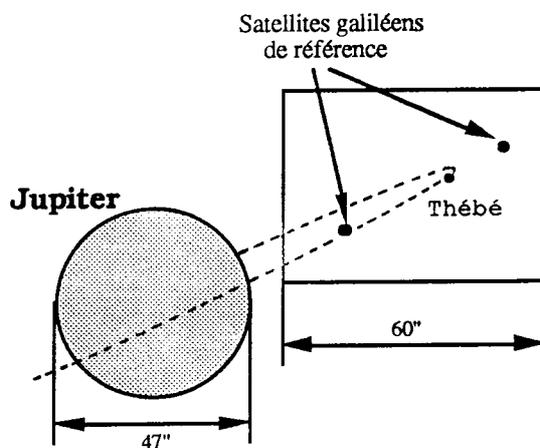


Figure 2.

Champ d'observation de Thébé et des satellites galiléens de repère.

1. Observations de Thébé

Les observations spatiales

Le satellite Thébé a été découvert sur des images de Voyager le 23 février 1979 (Synnott 1980). Le passage de la seconde sonde a été mis à profit pour obtenir des positions astrométriques de qualité. Ainsi, le 6 juillet 1979 l'équipe de navigation spatiale a profité d'un rapprochement entre Thébé et Amalthée et on possède 6 images permettant d'obtenir des positions différentielles de ces deux satellites. Ces observations ont une importance cruciale: en effet la précision des positions obtenues lors du premier passage n'est que de 0.06° car elle est liée à la connaissance de la position de la sonde, par contre en juillet 1979 il a été possible d'utiliser la caméra à haute résolution, la précision des positions relatives de Thébé et d'Amalthée est alors de 0.8 seconde de degré.

Les observations terrestres

Thébé a été observé en mars 1981 avec le télescope de 5m du Mont Palomar en utilisant un CCD Texas Instrument de 500×500 pixels et un filtre interférentiel centré sur une bande d'absorption du méthane. Le temps de pose était de 300 secondes et les perturbations dues à la lumière de Jupiter ont été diminuées avec un coronographe focal (Jewitt et al 1981). Les observations n'ayant duré que deux heures et le but principal des observateurs étant la détection des anneaux de Jupiter, il n'y a que quelques positions et les auteurs ne donnent qu'une date correspondant à une élongation.

Pascu et Seidelmann ont effectué quelques observations avec le télescope astrométrique de Flagstaff (Pascu et Seidelmann 1981). Ils donnent 9 distances par rapport à Amalthée: ces mesures ont permis d'ajuster la théorie du mouvement de Thébé par Synnott (1984). Les O-C de ces positions sont de l'ordre de la seconde de degré.

Les 1000 observations du Pic du Midi obtenues entre octobre 1988 et janvier 1990 (F. Colas, 1991) représentent donc la majeure partie de l'ensemble des positions de Thébé. De plus la date moyenne de ces observations se situant en 1989 est assez éloignée de celles des premières observations; elle a une importance particulière dans la détermination du moyen mouvement et de l'origine des longitudes. Le détecteur électronique utilisé dans le système d'acquisition d'images est une matrice CCD Thomson THX 7852 possédant 145×221 pixels. Il est monté dans un cryostat refroidi par deux étages de cellules à effet Peltier. La température atteinte se situe entre -45° et -50° suivant la température extérieure. Ce CCD anti éblouissement se révèle très efficace pour l'observation des petits satellites proches d'objets très brillants. Le faible éclat de Thébé impose des poses assez longues, en moyenne de 30 secondes. La qualité des images du Pic du Midi est un autre élément important; pour observer correctement les petits satellites, il est nécessaire d'avoir une turbulence atmosphérique inférieure ou égale à 1 seconde de degré. On dispose d'environ 1 000 positions dans un repère planétocentrique dans l'équinoxe 1950. Cette série d'observations a été complétée par une centaine de positions de Thébé obtenues dans les mêmes conditions en février 1990 et janvier 1991. La figure 3 donne la répartition de l'ensemble de ces observations dans le temps.

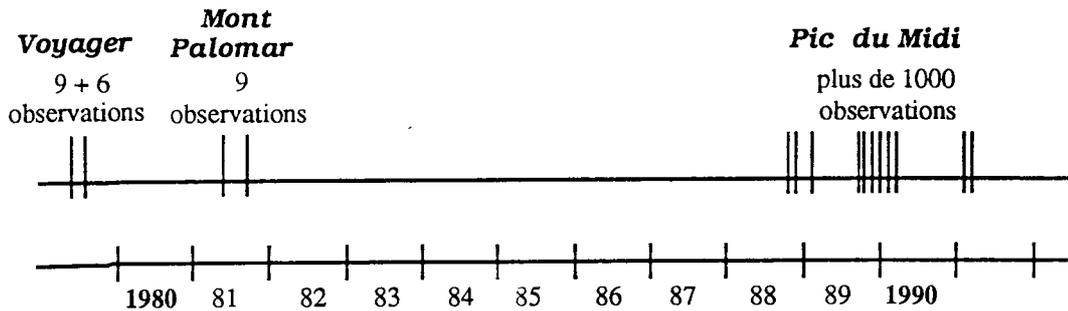


Figure 3
Répartition des observations de Thébé depuis sa découverte

2. Théorie du mouvement de Thébé

Avec une masse 100000 fois plus faible que la moyenne de celles des satellites galiléens, Thébé n'exerce qu'une action insignifiante sur le mouvement de l'équateur de Jupiter comme sur ceux des satellites galiléens. Son mouvement képlérien est fortement perturbé par la forme de Jupiter, ensuite par les satellites galiléens et aussi par le Soleil. Dans la construction de la théorie, nous utilisons des constantes physiques du système jovien issues des résultats des mesures réalisées par les sondes Pioneer 10 et 11 et Voyager par Null (1976) et par Campbell et Synnott (1985) :

le rapport de la masse de Jupiter à celle du Soleil		1/1047.5628
le rayon équatorial de Jupiter		71398 km
les coefficients de potentiel de Jupiter	J ₂	0.014733
	J ₄	-0.000587
	J ₆	0.000031

les masses des satellites galiléens relatives à celle de Jupiter :

0.00004684, 0.00002523, 0.00007803, 0.00005661.

et des éléments d'orbite de Thébé donnés par Synnott (1984) dans le repère défini par l'équateur de Jupiter et l'équinoxe de 1950.0. Ces éléments sont :

$t_0 = \text{JD } 2443937.817065$	$I = 0^\circ.8$
$e = 0.015$	$P_0 = 344^\circ$
$N = 533^\circ.7 / \text{jour}$	$l_0 = 354^\circ.3$

où e est l'excentricité de l'orbite, N , le moyen mouvement journalier, I l'inclinaison de l'orbite sur l'équateur de Jupiter, l_0 la longitude moyenne à la date t_0 , et P_0 la longitude du périjove de l'orbite.

Le mouvement de Thébé est rapide, il convient de construire une théorie à solution quasi-périodique afin d'obtenir une longue validité dans le temps. La méthode utilisée dans la construction de la théorie est celle de Sagnier (Sagnier, 1981) déjà appliquée à la théorie des satellites galiléens (W.Thuillot et D.T.Vu, 1983) et (D.T.Vu, 1986). Cette méthode permet la construction d'une théorie générale analytique. On considère Thébé évoluant sur une orbite képlérienne autour de Jupiter. Cette orbite est perturbée par la présence:

- . du renflement équatorial de Jupiter
- . des satellites galiléens
- . du Soleil.

L'excentricité de l'orbite et l'inclinaison de l'orbite sur le plan équatorial jovien étant faibles, dans la première phase de la résolution des équations du mouvement, on néglige ces deux quantités et on obtient une solution intermédiaire qui contient les termes dépendant explicitement du temps. Dans le cas de Thébé, les arguments de ces termes sont des combinaisons linéaires de la longitude de Thébé et celles des satellites galiléens et du Soleil. Dans la deuxième étape, la résolution des équations variationnelles contenant tous les termes qui ne dépendent pas du temps de façon explicite donne le mouvement à longue période du demi-grand axe et celui du mouvement du plan de l'orbite. La troisième étape développe et intègre les termes mixtes qui contiennent à la fois des variables sous forme littérale et d'un argument fonction du temps. La part dominante du mouvement variationnel est due à la forme ellipsoïdale de Jupiter. Le facteur de potentiel J_2 domine avec 98% environ de la totalité des différentes contributions au mouvement du grand-axe de l'orbite et celui de la précession du noeud de l'orbite.

Trois résultats intermédiaires intéressants concernent la perturbation séculaire du moyen mouvement et les principales contributions aux vitesses de rotation du grand axe de l'orbite et du noeud ascendant de l'orbite sur l'équateur de Jupiter. La première table récapitulative ci-dessous (table I) montre que le facteur de potentiel J_2 occupe la place dominante, autour de 98% du total des perturbations séculaires; les satellites galiléens ne participent que pour 0.4% environ. La perturbation séculaire du moyen mouvement représente environ 5% du moyen mouvement moyen.

Table I

Ordre de grandeur des perturbations

origine de la perturbation		perturbation du moyen mouvement		rotation du grand axe		précession du noeud de l'orbite	
-----		-----		-----		-----	
		(unité = radian/jour)		(unité = radian/jour)		(unité = radian/jour)	
Harmoniques du potentiel de	J ₂	0.00458312	99.0%	0.02134548	97.6%	-.02134549	98.2%
	(J ₂) ²	3378	0.7%	20789	1.0%	-7337	0.3%
Jupiter.....	J ₄	2367	0.5%	22047	1.0%	-22047	1.0%
	J ₂ .J ₄	45		442		-164	
	J ₆	15		-211		211	
Io	m ₁	978	-0.2%	8760	0.4%	-8761	0.4%
Europe	m ₂	104		790		-790	
Ganymède	m ₃	72		526		-526	
Callisto	m ₄	9		7		-7	
Soleil	m _S	2		17		-17	
...	J ₂ m ₁			-44		16	

La solution obtenue fournit les principales inégalités périodiques de la Table II.

Table II

Principales inégalités du mouvement de Thébé

longitude moyenne					
$\Sigma C_i \sin A_i$ (C_i en 1.10^{-7} radian)					
C _i	A _i	C _i	A _i	C _i	A _i
-----	-----	-----	-----	-----	-----
-532	l ₁₄ -l ₁	2	3l ₁₄ -3l ₃	-4	l ₁₄ -P ₃
1032	2l ₁₄ -2l ₁	-5	l ₁₄ -l ₄	13	l ₁ -P ₁₄
96	3l ₁₄ -3l ₁	3	2l ₁₄ -2l ₄	-227	l _S -P _S
22	4l ₁₄ -4l ₁	-209	l ₁₄ +l ₁ -2l ₂	221	l ₁₄ -2l ₁ +P ₁₄
-7	5l ₁₄ -5l ₁	-20	l ₁₄ -3l ₁ +2l ₂	8	l ₁₄ -2l ₂ +P ₁₄
2	6l ₁₄ -6l ₁	-51	2l ₁₄ -4l ₁ +2l ₂	7	l ₁₄ -2l ₃ +P ₁₄
-48	l ₁₄ -l ₂	6	3l ₁₄ -5l ₁ +2l ₂	117	2l ₁₄ -3l ₁ +P ₁₄
31	2l ₁₄ -2l ₂	1	4l ₁₄ -6l ₁ +2l ₂	-2	2l ₁₄ -3l ₂ +P ₁₄
3	3l ₁₄ -3l ₂	297871	l ₁₄ -P ₁₄	-10	3l ₁₄ -4l ₁ +P ₁₄
-37	l ₁₄ -l ₃	-1	l ₁₄ -P ₂	-3	4l ₁₄ -5l ₁ +P ₁₄
14	2l ₁₄ -2l ₃				

rayon-vecteur				latitude	
$\Sigma C_i \cos A_i$ (C_i en 1.10^{-7} radian)				$\Sigma C_i \sin A_i$ (1.10^{-7} radian)	
C _i	A _i	C _i	A _i	C _i	A _i
-----	-----	-----	-----	-----	-----
178	l ₁₄ -l ₁	3	l ₁₄ -l ₄	-140	l ₁₄ -W ₀
-594	2l ₁₄ -2l ₁	-8	2l ₁₄ -2l ₄	139626	l ₁₄ -w ₁₄
-68	3l ₁₄ -3l ₁	105	l ₁₄ +l ₁ -2l ₂	21	l ₁₄ -w ₁
-18	4l ₁₄ -4l ₁	3	l ₁₄ -3l ₁ +2l ₂	38	l ₁₄ -w ₂
-6	5l ₁₄ -5l ₁	24	2l ₁₄ -4l ₁ +2l ₂	10	l ₁₄ -w ₃
-2	6l ₁₄ -6l ₁	-3	3l ₁₄ -5l ₁ +2l ₂	4	l ₁₄ -w ₄
20	l ₁₄ -l ₂	-148677	l ₁₄ -P ₁₄		
-20	2l ₁₄ -2l ₂	2	l ₁₄ -P ₂		
-1	3l ₁₄ -3l ₂	-28	l ₁₄ -2l ₁ +P ₁₄		
16	l ₁₄ -l ₃	-3	l ₁₄ -2l ₂ +P ₁₄		
-10	2l ₁₄ -2l ₃	-50	2l ₁₄ -3l ₁ +P ₁₄		
		7	3l ₁₄ -4l ₁ +P ₁₄		

où les arguments élémentaires, exprimés en radians, ont pour expressions en fonction de t en jours à partir de JD 2447875.5 (table III)

Table III

l_{14}	= 3.0725792981	+ 9.31484155614 t	P_2	= 5.31523610270	+ 0.00082232235 t
P_{14}	= 3.5725544359	+ 0.02187875900 t	P_3	= 3.64891513698	+ 0.00012132307 t
w_{14}	= 4.4711670245	- 0.02174239900 t	P_4	= 6.03188078052	+ 0.00003311762 t
l_1	= 5.50111754863	+ 3.55155290956 t	P_s	= 0.25409690249	+ 0.00000066672 t
l_2	= 1.71099730607	+ 1.76932336960 t	w_1	= 5.40458494293	- 0.00233927352 t
l_3	= 4.52832587844	+ 0.87820859961 t	w_2	= 5.16963049229	- 0.00057071044 t
l_4	= 2.16421435433	+ 0.37648688635 t	w_3	= 1.59614659190	- 0.00012178094 t
l_s	= 1.31680940971	+ 0.00145021502 t	w_4	= 5.40452469504	- 0.00003063751 t
P_1	= 0.95589624080	+ 0.00275649448 t	W_0	= 5.53671693004	+ 0.00000062657 t

L'ajustement utilise les dérivées partielles des coordonnées par rapport aux paramètres e, i, J_2, n, l_0, P_0 et W_0 fournies par la théorie. On possède donc les dérivées partielles des positions pour chaque observation ainsi que les positions mesurées et calculées. Avant de construire la matrice normale on peut choisir d'ajuster seulement certains paramètres. Ajuster l'ensemble de paramètres en une fois paraît difficile car ils n'ont pas tous la même influence sur les positions. L'influence du mouvement moyen est en particulier beaucoup plus importante que celles des positions du périjove ou du noeud ascendant. Nous avons aussi dû tenir compte des spécificités des observations: on a en effet d'un côté 1000 observations terrestres d'une précision de 1000 km soit en considérant qu'elles sont indépendantes l'équivalent d'une position unique ayant une précision de 32 km et d'un autre côté 6 observations spatiales d'une précision de 60 km soit l'équivalent d'une position précise à 25 km. Les autres observations spatiales sont très médiocres et les quelques observations terrestres autres que celles du Pic du Midi ne sont pas disponibles ou, se situant trop près du passage de la sonde Voyager, n'ont que peu de poids dans l'ajustement de la théorie. Finalement on possède deux séries de positions qui ont un poids équivalent. Cependant les observations du Pic du Midi s'étaient sur deux ans tandis que celles de Voyager ne recouvrent qu'une période de 12 minutes! Nous avons donc décidé de convertir les observations de Voyager en un point moyen ayant un poids équivalent à l'ensemble des observations spatiales. De plus nous n'avons utilisé les observations spatiales que pour déterminer le mouvement moyen et l'origine des longitudes. Pour que la méthode des moindres carrés fonctionne correctement, il est indispensable d'être proche de la solution; or la position du périjove ainsi que celle du noeud ascendant étaient inconnues. Nous avons obtenu une solution ayant un mouvement moyen et une longitude à l'origine correctes. Les autres paramètres ont été ajustées uniquement sur les observations du Pic du Midi qui, bien que bien moins précises, recouvrent plusieurs orbites de Thébé.

Conclusion

Le premier résultat basé sur l'ajustement utilisant un nombre important d'observations constitue déjà une amélioration par rapport aux éphémérides utilisées jusqu'à présent qui admettent que l'orbite est circulaire et son inclinaison sur l'équateur est nulle. Nous continuons à affiner l'ajustement au moyen d'un programme plus élaboré incluant également des observations récentes.

Références

- Colas F. : 1991, Thèse de doctorat, Observatoire de Paris
 Campbell, Synnott S. P. : 1985, Gravity Field of the Jovian System, *Astron. J.*, **90**, 364
 Jewitt D. C., Danielson G. E. : 1979, *Science*, **206**, 951
 Jewitt D. C., Danielson G. E., Terrile R. J. : 1981, *Icarus*, **48**, 536-539
 Null G. W. : 1976, Gravity field of Jupiter and its satellites, *Astron. J.*, **81**, 1153-1161
 Pascu D., Seidelmann P. K. : 1981, *IAUC* n° 3603
 Sagnier J. L. : 1981, Thèse d'Etat, Université Paris VI
 Synnott S. P. : 1981, *Science*, **212**, 1392
 Synnott S. P. : 1984, *Icarus*, **58**, 178-181
 Thuillot W., Vu D. T. : 1983, S. Ferraz Mello et P.E. Nacosy, Universidad de Sao Paulo, 273-294
 Vu D. T. : 1986, Thèse d'Etat, Observatoire de Paris

ANALYSE D'OBSERVATIONS D'ECLIPSES DES SATELLITES GALILEENS DE JUPITER

William Thuillot et Pascal Descamps

Résumé:

Les éclipses des satellites galiléens de Jupiter ont été observées rapidement après la découverte des satellites en 1610 et nous disposons donc de données très précieuses pour l'analyse du comportement à long terme de ce système de satellites. Nous avons cherché dans ce travail d'une part à augmenter le nombre de ce type d'observations déjà répertoriées, à en apprécier la précision, et d'autre part à leur appliquer des techniques d'analyse spectrale pour en extraire des informations sur des effets périodiques pour l'instant négligés dans les modèles. Dans l'état actuel de ce travail, nous en déduisons essentiellement des valeurs numériques d'un modèle d'effet de phase. Ces valeurs sont liées aux caractéristiques de surface des satellites, elles vérifient les prédictions théoriques de cet effet, et sont cohérentes avec les résultats que nous obtenons dans d'autres travaux. Elles devraient permettre d'améliorer les analyses astrométriques et les travaux dynamiques futurs basés sur ce type d'observations.

1. Introduction

Les satellites galiléens ont la particularité de présenter des phénomènes qui ont été observés rapidement après leur découverte en 1610. Ce sont essentiellement les éclipses qui ont été observées et ces observations présentent donc un grand intérêt astrométrique puisque l'on a ainsi des renseignements concernant le comportement orbital de ces satellites sur une période de plus de 330 années. C'est ainsi qu'une accélération séculaire a pu être estimée grâce à ces observations (Lieske 1987). Nous avons mené précédemment plusieurs travaux dans le but d'étudier ce type d'observations. Du point de vue théorique deux modèles de calcul de phénomènes ont été élaborés (Thuillot 1983, Thuillot 1989). Un travail d'analyse de 845 observations d'éclipses avait été mené après la découverte des manuscrits de Delambre (Arlot et al. 1984). Puis 4411 observations d'occultations avaient été analysées (Fairhead et al. 1986, 1987). Et plus récemment une première analyse spectrale d'observations d'éclipses a été réalisée (Descamps 1989). Ce travail avait alors permis la détection d'effets périodiques et nous avons poursuivi cette analyse pour essayer d'améliorer l'interprétation de ces résultats.

2. Les observations:

Les premiers résultats obtenus dans l'analyse spectrale l'avaient été après l'étude d'un ensemble important de 10800 observations d'éclipses répertoriées par Lieske (1986a, 1986b). Il nous est apparu intéressant d'analyser un ensemble d'observations plus dense, car des lacunes existent pour des zones qui peuvent s'étendre sur plusieurs dizaines d'années. C'est pourquoi une analyse d'environ 4600 observations nouvellement répertoriées a été menée. Elle concerne les quatre satellites (Table I) et sont en grande partie issues de la base de données actuellement en élaboration au Bureau des Longitudes (Arlot 1992) et s'étendent de 1671 à 1905.

	Io	Europe	Ganymède	Callisto
EC.D	1014	446	515	207
EC.F	1155	539	514	239

Table I. Nombre des nouvelles observations d'éclipses analysées par satellite et par type de phénomène (ECD: débuts d'éclipse, ECF: fins d'éclipse).

Les sources dont elles sont extraites ne sont citées dans aucun des travaux cités précédemment et l'on peut espérer ainsi effectivement densifier la collection des éclipses répertoriées. Par ailleurs, cette analyse a porté également sur des données issues de l'analyse de manuscrits anciens. Un petit ensemble d'observations provient ainsi d'un mélange d'observations collectées par Delambre appartenant aux manuscrits précités mais que nous n'avions pas alors analysés. Un autre groupe d'observations provient de manuscrits apparemment restés dans l'oubli, qui résultent des travaux d'observations faits au XVIII^{ème} siècle à Marseille par le père minime Sigalloux, qui nous avait été signalés par M. Froeschlé (OCA-CERGA) et dont on retrouve la trace dans des manuscrits de l'Observatoire de Paris. D'autres observations d'une époque voisine proviennent de ces mêmes manuscrits de l'Observatoire de Paris et sont dues au père minime Feuillée. Si ces sources et ces observateurs ne sont pas cités dans les travaux précédents, cependant seule la comparaison des dates d'observations et des écarts observation moins théorie (O-C) avec ces travaux nous permettra de dénombrer les observations réellement nouvelles. Elles ont en effet souvent été recopiées et réutilisées, et peuvent donc avoir tout de même été répertoriées. on peut cependant constater grâce à la figure 1 que l'objectif est déjà atteint sur une période voisine de 1760 et concernant le satellite Io. Ce travail de dénombrement et d'analyse est en cours. Nous pensons ainsi atteindre bientôt une collection d'environ 6000 observations dont on aura apprécié la précision par comparaison aux éphémérides modernes. Un travail non négligeable restera à fournir pour permettre le traitement simultané de ces observations et des observations précédemment répertoriées par d'autres auteurs. Il consistera à homogénéiser le type de réduction qui est effectuée. En effet, l'on sait rarement à quel phase du phénomène correspond l'instant donné par l'observateur, c'est en général la date de la dernière lueur des satellites en début d'éclipses (ou de la première lueur pour les fins d'éclipses) plutôt que celle du demi-éclat, mais le seuil de sensibilité des instruments anciens et les équations personnelles entâchent cette mesure d'une erreur. Nous sommes alors conduits à adopter des hypothèses nécessaires à la comparaison aux valeurs théoriques et qui ont une incidence importante sur l'ordre de grandeur des résidus obtenus.

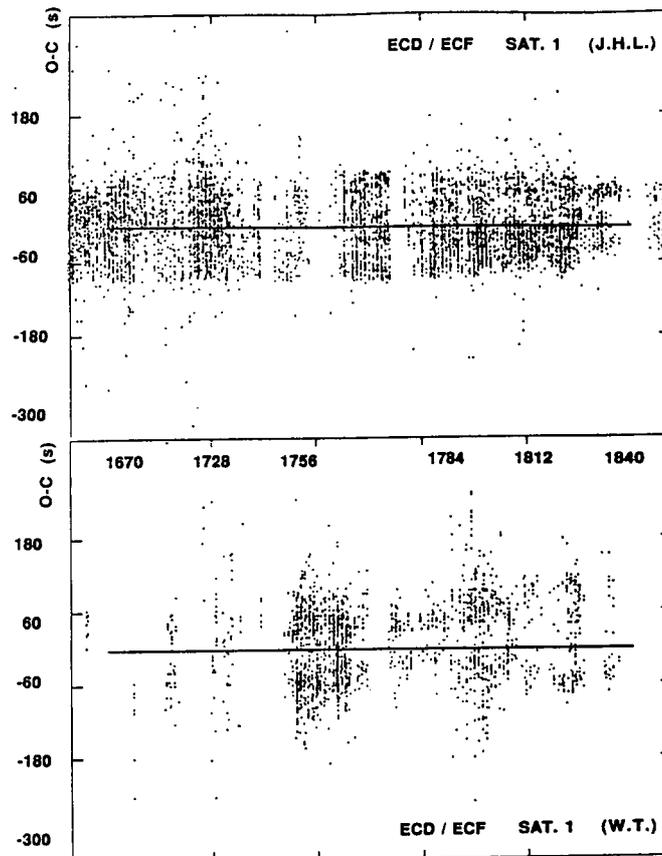


Figure 1. Résidus obtenus pour les éclipses de Io comparés à ceux issus de Lieske(1986)

3. L'analyse spectrale:

Nous poursuivons la densification de l'ensemble des observations d'éclipses, et cherchons simultanément à améliorer la méthode d'analyse spectrale que nous désirons appliquer, cette amélioration n'est pour l'instant recherchée que sur l'ensemble des éclipses de Lieske. Une fois cet ensemble comparé à un modèle théorique, des résidus (O-C) sont obtenus et l'analyse spectrale permet de rechercher dans ces résidus des effets périodiques qui peuvent être le résultat d'une imperfection du modèle et représenter ainsi un effet physique non pris en compte. C'est ainsi que la détection du terme de période 1.09 an avait été interprétée comme résultant d'un effet global de surface. En effet, cette période, correspondant à la période synodique de Jupiter, est celle de l'effet de phase géométrique affectant le système galiléen. Cet effet est faible puisque l'angle de phase n'atteint qu'environ 11° . Cependant on peut constater par des modélisations numériques qu'il est amplifié par la façon dont la lumière est réfléchié par la surface du satellite. Cet effet se traduit en particulier par un déplacement du photocentre qui est dix fois plus élevé que celui d'une modélisation purement géométrique. Il a été estimé pouvoir atteindre environ $0''.06$ (190km) par Lindegren (1977), puis Aksnes, Franklin et Magnusson(1986) et Deviatkin et Bobylev(1988) dans des hypothèses différentes. Ce n'est donc pas un effet négligeable dans les analyses astrométriques. Actuellement seules les observations de phénomènes mutuels ont permis de vérifier ce type d'estimation, c'est un travail que nous poursuivons également (Thuillot et Descamps 1990, Descamps 1992). Les observations d'éclipses sont cependant un moyen d'estimer cet effet de surface, car il est probablement prépondérant dans les lacunes du modèle de réduction des observations d'éclipses. Nous avons donc introduit une fonction de phase périodique pour le représenter et nous avons déduit de nouveaux résidus après ajustement par les moindres carrés. Les amplitudes de cette fonction, propre à chaque satellite, issues de ce type d'ajustement sont données dans la table II et sont conformes aux prédictions.

	Io	Europe	Ganymède	Callisto
EC.D	0".029	0".042	0".032	0".049
	105 km	152 km	118 km	178 km
EC.F	0".023	0".030	0".029	0".052
	85 km	110 km	105 km	190 km

Table II. Corrections maximales de photocentre issues des analyses spectrales pour les débuts et les fins d'éclipses des satellites galiléens.

Les éclipses des satellites galiléens résultent du passage des satellites dans le cône d'ombre de Jupiter. Ces phénomènes sont donc le siège de plusieurs effets périodiques dont les principaux sont:

- l'effet de surface global de période 1.09 an
- les effets de variations locales d'albédo, ou effets de surface locaux, qui sont combinés avec le précédent et qui doivent également créer un effet de période 11.8 ans puisque les satellites étant synchrones, la même surface est concernée par les éclipses avec cette périodicité.
- les variations de déclinaison jovicentrique du Soleil qui impose aux satellites des traversées du cône d'ombre à des latitudes différentes avec une période de 5.95 ans
- ces mêmes variations créent d'ailleurs une disparition des phénomènes de Callisto avec la même période pour une durée d'environ 3 ans.
- le mouvement relatif de la Terre et de Jupiter empêche l'observation de ces phénomènes pendant les conjonctions avec une période de 1.09 an et pour une durée d'environ trois mois.

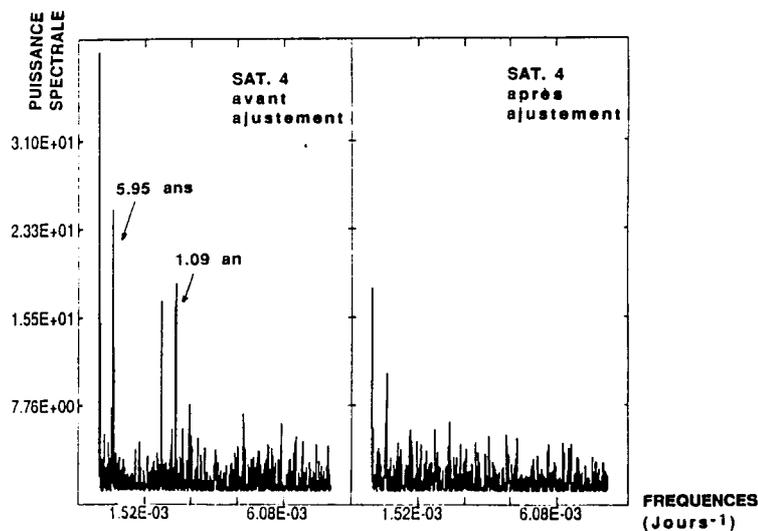


Figure 2. Analyse spectrale des débuts d'éclipses de Callisto avant et après ajustement d'une fonction de phase

C'est l'ensemble de ces effets qui doit intervenir dans l'analyse spectrale des observations d'éclipses. Les effets de surface sont les effets les plus importants que l'on a mis en évidence. La technique de cette analyse rend compte cependant d'un effet de fenêtrage périodique dû aux périodes d'invisibilité signalées: les pics de fréquence du spectre obtenu sont affectés de pics secondaires, et des répliques de ces pics existent à intervalle régulier. La figure 2 montre ainsi ce type de pics de fréquence obtenus pour Callisto avant et après ajustement d'un effet de phase. On y voit, par ailleurs, la disparition quasi totale du pic de période 1.09 an après analyse de l'ensemble des résidus corrigés de l'effet de phase. Nous avons cherché à améliorer notre analyse en introduisant une déconvolution du signal pour prendre en compte le fenêtrage périodique dû aux conjonctions et éliminer ainsi les effets perturbateurs sur la forme et le nombre des pics de fréquence. La figure 3 montre le résultat d'une telle analyse spectrale concernant les débuts d'éclipses de Io après déconvolution, avant puis après ajustement d'un modèle de phase. Pour ce satellite, une fréquence est toujours détectée après ajustement, elle pourrait être due à l'effet local de surface qui n'est pas encore pris en compte.

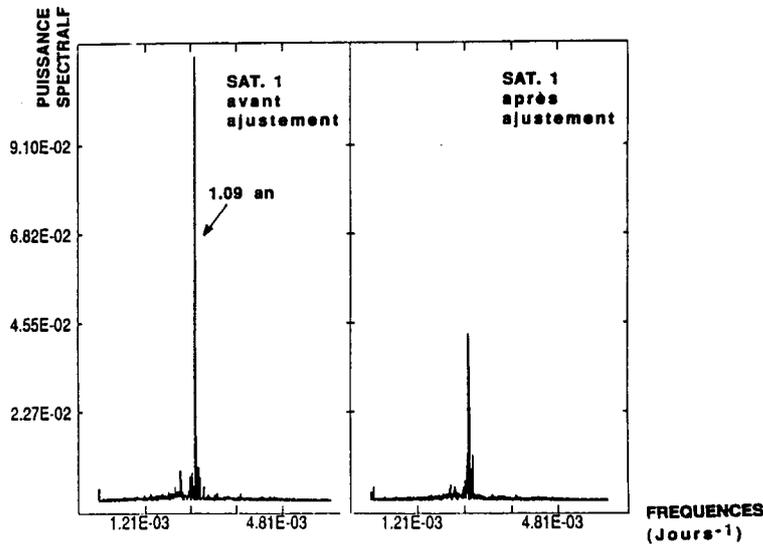


Figure 3. Analyse spectrale des débuts d'éclipses de Io avant et après ajustement d'une fonction de phase et avec déconvolution du signal.

4. Conclusion

Les résultats actuels sont provisoires mais montrent que l'interprétation d'un effet périodique de 1.09 an vérifie l'analyse d'autres auteurs sur l'influence des effets de surface dans les mesures de photocentre des satellites galiléens. Cependant plusieurs problèmes restent à l'étude, en particulier un terme assez important de période 5.95 ans détecté dans les résidus des satellites Ganymède et Callisto n'est pas encore expliqué. Nous pensons améliorer ces résultats par la densification de l'ensemble des observations qui est en cours, et l'utilisation des techniques de déconvolution que nous avons commencé d'appliquer.

Références:

- Aksnes, K., Franklin, F., Magnusson, P.: 1986, The longitude discrepancy for mutual satellite phenomena resolved, *Astron. J.* **92**, 1436
- Arlot, J.-E.: 1992, Création d'un centre de données astrométriques sur les satellites, *Journées Scientifiques 1992*.
- Arlot, J.E., Morando, B., Thuillot, W.: 1984, An analysis of recently rediscovered eclipse observations of the first satellite of Jupiter made between 1775 and 1802, and collected by Delambre, *Astron. Astrophys.* **136**, 142
- Descamps, P.: 1989, Etude d'observations d'éclipses des satellites galiléens de Jupiter par analyse de Fourier, Rapport de stage de DEA, Observatoire de Paris
- Descamps, P.: 1992, Les effets de surface dans les observations de phénomènes mutuels des satellites galiléens, *Journées Scientifiques 1992*.
- Deviatkin, A.V., Bobilev, V.V: The influence of the phase and the non-homogeneity of reflective surface of galilean satellites of jupiter on coordinate determinations. *Astr. Tsirk.* **1533**, 23
- Fairhead, L., Arlot, J.E., Thuillot, W.: 1986, An analysis of occultation observations of the Galilean satellites of Jupiter and comparison with theories, *Astron. Astrophys.* **169**, 360
- Fairhead, L., Arlot, J.E., Jannot, Y., Thuillot, W.: 1987, A catalogue of occultation observations of the Galilean satellites of jupiter, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **68**, 81
- Lieske, J.H.: 1986a, A collection of Galilean satellite eclipse observations, 1652-1983: Part I, *Astron. Astrophys.* **154**, 61
- Lieske, J.H.: 1986b, A collection of Galilean satellite eclipse observation, 1652-1983: II, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **63**, 143
- Lieske, J.H.: 1987, Galilean satellite evolution: observational evidence for secular changes in mean motions, *Astron. Astrophys.* **176**, 146
- Lindgren, L.: 1977: Meridian observations of planets with a photoelectric multislit micrometer, *Astron. Astrophys.* **57**, 55
- Thuillot, W.: 1983, Théorie des phénomènes des satellites galiléens de Jupiter: une représentation par les polynômes de Tchebychev, *Astron. Astrophys.* **127**, 63
- Thuillot, W.: 1989, La prédiction des phénomènes des satellites galiléens de Jupiter, *Notes Scientifiques et Techniques du Bureau des Longitudes*, S015
- Thuillot, W., Descamps, P.: 1990, A model for the lightcurves of the mutual events, compte-rendus du "workshop PHEMU91", Teramo, Arlot J.E. et Burchi, R. eds.

RAPPROCHEMENTS ET OCCULTATIONS ENTRE ETOILES ET ASTEROIDES

Jérôme Berthier

Avant d'aborder les problèmes spécifiques aux prédictions de rapprochements et d'occultations entre étoiles et astéroïdes, il est intéressant de rappeler quelles sont les applications de telles observations et quelles sont les précisions obtenues.

1 DOMAINES D'APPLICATIONS DES OBSERVATIONS D'ASTEROIDES

Les observations du mouvement apparent des astéroïdes relativement à un champ d'étoiles possèdent de nombreuses applications telles que :

- L'observation des positions relatives entre astéroïdes et étoiles "fondamentales" (i.e appartenant à un catalogue de référence) permet de quantifier les erreurs systématiques du catalogue (en positions) et du système de référence (position de l'équinoxe et de l'équateur).
- L'observation des positions relatives entre astéroïdes et étoiles non cataloguées permet l'intégration de ces étoiles à des catalogues existant avec la même précision que celles cataloguées. De plus, cela permet de relier divers catalogues entre eux.
- L'observation des positions relatives entre astéroïdes et radio-sources optiques permet la comparaison directe entre un système de référence dynamique (établi à partir du mouvement des petites planètes) et un système de référence absolu (obtenu à partir des radio-sources).
- L'observation du mouvement des astéroïdes dans un système de référence relatif permet de définir des longitudes écliptiques absolues et des latitudes écliptiques à un facteur d'échelle près.
- L'observation des positions relatives entre astéroïdes et étoiles de magnitudes similaires permet la construction d'un système de référence déterminé dynamiquement et constitué d'étoiles faibles, indépendant des erreurs de magnitudes habituelles.
- L'observation des occultations d'étoiles par des astéroïdes ont une très haute précision astrométrique et apportent des renseignements planétologiques : structure, forme, dimension et environnement des astéroïdes.
- L'observation des astéroïdes fournit une base d'étude pour :
 - (a) *L'astrométrie* : recherche des effets systématiques dans les systèmes de référence fondamentaux ou absolus.
 - (b) *La cinématique stellaire* : l'observation des astéroïdes fournit un système de référence déterminé dynamiquement ainsi que des positions et des mouvements d'étoiles "faibles" (i.e de magnitude 16) dans ce système de référence. Il est ainsi possible de vérifier la validité de certaines méthodes statistiques en dynamique stellaire ou dans la détermination des distances.
 - (c) *La cosmologie* : comparaison entre un système de référence extragalactique et un système de référence dynamique.

Cependant, il est nécessaire d'avoir à l'esprit que ces observations d'astéroïdes possèdent certaines limites. La première contrainte réside dans les magnitudes faibles des astéroïdes (très souvent au delà de la magnitude 12) qui limitent les observations au moment de l'opposition, ce qui implique une très forte corrélation entre les paramètres mesurés. D'autre part, les observations sont limitées à une bande proche de l'écliptique (environ $\pm 30^\circ$), ce qui ne représente qu'une faible partie de la sphère céleste. Enfin, comme la précision du moyen mouvement dépend directement de l'intervalle de temps pendant lequel ont été réalisées les observations, et comme ces observations

ne peuvent être réalisées qu'à l'opposition, il est quasiment nécessaire d'utiliser de vieilles observations, ce qui représente un facteur limitatif de la précision.

2 PRECISIONS DES POSITIONS OBSERVEES

La précision des positions observées est conditionnée par l'ensemble des erreurs systématiques et aléatoires faites lors des mesures. Ainsi, on distingue :

- L'erreur faite sur la position initiale de l'étoile.
- L'erreur faite sur la position (éphémérides) de l'astéroïde.
- L'erreur faite sur la position observée de l'étoile.
- L'erreur faite sur la position observée de l'astéroïde.
- L'erreur due à la corrélation des observations.

Pour des observations photographiques, une bonne estimation de l'erreur dite "externe" peut être donnée par l'expression (cf Pascu et Schmidt 1990) :

$$e_t^2 = \frac{e_{sc}^2 + (Se_{so})^2}{(n - m)} + (Se_{po})^2 \quad (1)$$

dans laquelle e_t représente l'erreur totale externe en position d'un objet p situé au centre du champ observé; e_{sc} est l'erreur de catalogue de l'étoile de référence (en arcsec); e_{so} est l'erreur observationnelle de l'étoile de référence (en mm); e_{po} est l'erreur totale observationnelle de l'objet p (en mm); S est le facteur d'échelle de la plaque photographique (en arcsec/mm); n est le nombre d'étoiles de référence utilisées lors de la réduction de la plaque; et m est le nombre de degrés de liberté (i.e le nombre de constantes déterminées lors de la réduction de la plaque).

On appelle erreur "externe" l'erreur commise sur la position d'un objet sans tenir compte de toutes les erreurs systématiques du catalogue. Les erreurs non prises en compte sont les erreurs de magnitudes et les erreurs de zone du catalogue (distortion en α et δ lorsqu'on passe d'un champ à un autre). Dans l'expression (1), le premier terme représente les erreurs dites "accidentelles" provenant du système de référence (catalogue et observation), tandis que le deuxième terme représente les erreurs de plaque et de nuit provenant de l'observation de l'objet p uniquement. On remarque que l'erreur totale e_t dépend de la focale de l'instrument utilisé par l'intermédiaire de la variable S . Ainsi on peut rechercher l'instrument optimisant l'erreur totale (cf Pascu et Schmidt 1990). Le tableau 1 donne les valeurs de e_t en fonction de différentes longueurs focales d'instrument. Pour ce calcul, Pascu et Schmidt ont pris comme catalogue de référence le Naval Observatory Zodiacal Catalog (Schmidt *et al.* 1980) donnant $e_{sc} = \pm 0.28$ arcsec. La densité du catalogue est prise égale à 10 étoiles par degrés carré et la dimension des plaques photographiques vaut 5x7 in. (excepté pour $S = 10$ arcsec/mm où la dimension de la plaque est 8x10 in.). Les valeurs de e_{so} et e_{po} sont prises égales à $\pm 3\mu\text{m}$ (c.f Pascu et Schmidt 1990).

S	n	m	Racine carrée du 1 ^{er} terme (arcsec)	Racine carrée du 2 ^{ème} terme (arcsec)	Erreur totale e_t (arcsec)
(arcsec/mm)					
10	3	1	±0.20	±0.03	±0.20
20	5	1	±0.14	±0.06	±0.16
40	20	5	±0.08	±0.12	±0.14
60	30	5	±0.07	±0.18	±0.19
100	30	5	±0.08	±0.30	±0.31

Tableau 1 : Variation de l'erreur en fonction de S

— Pascu et Schmidt 1990 —

Il ressort de ce tableau que l'instrument donnant la meilleure précision doit avoir un facteur d'échelle compris entre 20 arcsec/mm et 40 arcsec/mm, ce qui représente une longueur focale comprise entre 5m ($S=40$ arcsec/mm) et 10m ($S=20$ arcsec/mm). D'autre part, il apparait que pour des grandes longueurs focales l'erreur prédominante est celle due au catalogue tandis que pour des petites longueurs focales, l'erreur principale provient de l'imprécision des mesures de positions de l'objet sur la plaque.

Une autre étude intéressante à mener est la comparaison de la précision obtenue en fonction du catalogue de référence employé (à partir du même calcul d'erreur). Pour ce travail, j'ai choisi un télescope de longueur focale 20m soit $S = 10 \text{ arcsec/mm}$. J'ai remplacé la plaque photographique par une cible CCD 512x512 de dimension 10x10 mm. Les erreurs $e_{s,o}$ et $e_{p,o}$ faites sur les mesures de positions de l'étoile et de l'objet sur la cible sont calculées pour un rapport signal sur bruit d'observation de 10. Les valeurs de $e_{s,o}$ et de $e_{p,o}$ sont alors de l'ordre de 0.1 pixel (F.Colas *communication privée*), soit environ $\pm 3\mu\text{m}$. Les tableaux 2 et 3 résument l'ensemble des résultats trouvés.

Catalogue	$e_{s,c}$ (arcsec)	n	m	Racine carrée du 1 ^{er} terme (arcsec)	Racine carrée du 2 ^{ème} terme (arcsec)	Erreur totale e_t (arcsec)
AGK3	± 0.28	0.0034	1	± 0.28	± 0.03	± 0.28
SAO	± 2.00	0.0048	1	± 2.00	± 0.03	± 2.00
GSC	± 1.70	0.2800	1	± 2.00	± 0.03	± 2.00
PPM	± 0.27	0.0065	1	± 0.27	± 0.03	± 0.27
Hipparcos	± 0.002	0.0020	1	± 0.03	± 0.03	± 0.04
Tycho	± 0.02	0.0075	1	± 0.03	± 0.03	± 0.04

Tableau 2 : Variation de l'erreur en fonction du catalogue

Catalogue	Densité * ($*/(d^\circ)^2$)	Nombre d'étoiles (approximatif)
AGK3	4.4	183000
SAO	6.3	260000
GSC	363	15000000
PPM	8.5	182000
Hipparcos	2.4	100000
Tycho	9.7	400000

* : La densité des catalogues est calculée à partir d'une distribution uniforme des étoiles sur la sphère céleste, excepté pour le PPM qui couvre en déclinaison de -2.5° au pôle nord.

Tableau 3 : Densité et nombre d'étoiles des catalogues

La première conclusion évidente à la vue de ces résultats est que l'erreur totale est conditionnée par les erreurs systématiques du catalogue de référence. Une grande précision sur les positions des astéroïdes et des étoiles observés (et par suite sur l'ensemble des paramètres sous-jacents) n'est donc possible que par la possession de catalogues de référence de grande précision.

On remarque d'autre part que l'erreur commise sur les mesures de positions observées ($e_{s,o}$ et $e_{p,o}$) dans le cas d'une cible CCD est identique à celle des mesures faites sur plaques photographiques. En réalité, il apparaît que ces erreurs pour les plaques photographiques sont largement sous-estimées (cf Pascu et Schmidt 1990). Elles sont plus proches des $\pm 5\mu\text{m}$ que des $\pm 3\mu\text{m}$. De plus, dans le cas d'une cible CCD, la valeur de $\pm 3\mu\text{m}$ que j'ai utilisée est représentative d'observations courantes. Ces erreurs sont susceptibles d'atteindre les $\pm 1\mu\text{m}$ (et même moins) dans le cas de bonnes observations (par exemple $\pm 0.75\mu\text{m}$ pour un rapport signal sur bruit de 40). Pratiquement, il est donc possible d'obtenir des erreurs totales de l'ordre du millième de seconde d'arc. Du point de vue de la précision des catalogues, il est possible d'atteindre de telles erreurs (par exemple l'Output Catalogue d'Hipparcos). Malheureusement le tableau 2 nous montre que la densité d'étoiles du catalogue est aussi un facteur limitant la précision. L'exemple le plus significatif est la comparaison entre les deux catalogues de la mission Hipparcos : l'Output Catalogue d'Hipparcos et celui de la mission Tycho. Les erreurs totales trouvées pour ces deux catalogues sont identiques alors qu'il existe un facteur 10 sur la précision de position sur les étoiles en faveur du catalogue Hipparcos tandis que le catalogue Tycho a une densité d'étoile 4 fois plus grande que celle d'Hipparcos.

3 PREDICTIONS DE RAPPROCHEMENTS ET D'OCCULTATIONS

3.1 Objectifs des prédictions

L'exploitation des observations d'astéroïdes (i.e rapprochements et occultations) et donc des données astrométriques et planétologiques qui en ressortent ne peuvent être obtenues que par de nombreuses observations d'une grande précision. L'objectif primordial des prédictions est donc de fournir des prévisions d'observations les plus précises possibles pour qu'un maximum de ces observations puisse être réalisées. D'autre part, ces prédictions doivent être adaptées à l'utilisation des observations que l'on désire. Ainsi, il est nécessaire d'intégrer des catalogues d'étoiles faibles, de radiosources, et du maximum d'étoiles fondamentales dans le calcul des prédictions. Enfin, ces prédictions doivent fournir :

- l'ensemble des phénomènes pour une période donnée dans une zone (alpha,delta) déterminée.
- l'ensemble des phénomènes pour un astéroïde particulier sur une période quelconque.
- l'ensemble des phénomènes pour une époque donnée pour un ensemble d'astéroïdes déterminé.

C'est en fait le troisième point le plus important puisque c'est sous cette forme que la diffusion de prédictions est la plus intéressante. Mais il est nécessaire de développer les deux autres types de prédictions car par exemple, le premier type de prédiction peut servir au programme de survey à $2.2\mu m$ du ciel : connaissance dans chaque zone du survey de l'ensemble des astéroïdes en croisière, et le deuxième type de prédictions peut servir à la préparation d'une mission spatiale dont un objectif est le survol d'un astéroïde.

3.2 Les moyens dont on dispose

A l'heure actuelle, nous disposons de quelques catalogues donnant des positions d'étoiles à quelques dixièmes de seconde d'arc (PPM, Output Catalogue d'Hipparcos, AGK3), qui seront complétés par l'arrivée des catalogues de sortie de la mission Hipparcos prévue en 1994-95. Les orbites de 4 à 5 mille astéroïdes sont bien connues et déterminées à quelques dixièmes de seconde d'arc. Cette précision peut être augmentée par les observations dites de dernière minute et par l'exploitation régulière des observations faites. Enfin, nous disposons des moyens informatiques suffisant pour gérer les gros codes de calcul que nécessitent les prédictions.

3.3 Les problèmes majeurs

- Taille des catalogues :

La taille importante des catalogues (par exemple, le PPM possède presque 400000 étoiles qui demande environ 40 MO pour le stocker) nécessite un remaniement de leur structure pour faciliter les entrées/sorties lors du calcul des prédictions.

- Les éphémérides des astéroïdes :

De bonnes prédictions passent par une grande précision dans la position des astéroïdes. Il est donc nécessaire de posséder des éphémérides très précises.

- Codes de calcul des prédictions :

La gestion de nombreux catalogues d'étoiles et de l'intégration numérique des orbites des astéroïdes demandent des moyens informatiques très lourds. Il est donc important de moduler le code de calcul des prédictions pour l'adapter à différents moyens informatiques (PC, VAX, stations, ...).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- DUNCOMBE, R.L., HEMENWAY, P.D.—A comparison of astrometric measurement techniques as applied to minor planets.—*Celestial Mechanics* 26, 1982.
- HEMENWAY, P.D.—A fundamental system based on observations of minor planets.—*Celestial Mechanics* 22, 1980.
- JEFFERYS, W.H.—On the method of least squares.—*Astronomical Journal*, vol. 85, no. 2, Feb. 1980.
- JEFFERYS, W.H.—On the method of least squares. II.—*Astronomical Journal*, vol. 86, no. 1, Jan. 1981.
- KOVALEVSKY, J.—Astrométrie moderne.—Lecture notes in physics, 1990.
- ORELSKAYA, V.I.—On the improvement of star positions from minor planet observations.—*Asteroids, comets and meteoric matter*, IAU Colloquium no. 22, 1974.
- PASCU, D.—A note on the astrometric precision of minor planet observations.—*IAU Colloquium* no. 127, 1990.
- PASCU, D., SCHMIDT, R.E.—Photographic positional observations of saturn.—*Astronomical Journal* 99, no. 6, Jun. 1990.
- PODOBED, V.V.—*Fundamental astrometry*.—The University of Chicago Press, 1965.
- WHIPPLE, A.L., DUNCOMBE, R.L., HEMENWAY, P.D.—Improving the dynamical reference frame through minor planet orbit correction using crossing point observations.—*Earth's rotation and reference frames for geodesy and geodynamics*.—IAU Symposium no. 128, 1988.

LES EFFETS DE SURFACE DANS LA REDUCTION DES OBSERVATIONS DE PHÉNOMÈNES MUTUELS DES SATELLITES DES PLANETES.

P. Descamps

1 - Introduction.

Les dimensions apparentes relativement importantes des satellites galiléens de Jupiter (environ 1") par rapport aux autres satellites du système solaire nécessitent, lors de la réduction d'observations (détermination du temps du milieu d'éclipse d'un satellite par Jupiter, de la position du centre du satellite pour des observations photographiques à long foyer ou de la date du minimum de distance pour des phénomènes mutuels), de tenir compte des phénomènes liés à la phase (12° maxi.) et à la diffusion de la lumière solaire par la surface.

La conséquence de ceux-ci est l'existence d'un décalage entre la position du photocentre et la position du centre de gravité. Ces effets induisent des erreurs systématiques dans les observations qui ont été mises en évidence en 1976 par Aksnes et Franklin, confirmées en 1980 par Lieske, puis expliquées par Aksnes en 1986 qui les interpréta alors comme un effet dû à la phase.

Le but de ce travail est d'étudier l'influence de ces effets lors de la réduction astrométrique de l'observation de phénomènes des satellites galiléens grâce à l'utilisation pour chaque satellite d'une loi de diffusion de la lumière par la surface. Les phénomènes mutuels, en raison de l'absence d'atmosphère autour des satellites galiléens qui permet de s'affranchir des problèmes liés à la diffusion et à la réfraction de la lumière lors de la traversée d'une atmosphère, constituent des observations tout à fait précises et donc tout à fait appropriées au but recherché.

Par ailleurs, les techniques infrarouges appliquées depuis 1985 aux phénomènes mutuels mettant en jeu des occultations de Io débouchent elles aussi sur des résultats astrométriquement très intéressants de par la détection de détails de surface très pointus que constituent les volcans de Io.

2 - Effets de surface.

Le comportement photométrique global des surfaces des satellites peut être modélisé par l'utilisation d'une loi de diffusion de la lumière solaire par celles-ci. Toutefois, ces surfaces présentent des caractéristiques locales telles que des zones plus ou moins fortement contrastées en albédo ou des détails de surface très ponctuels (volcans de Io) qui nécessitent un traitement spécial.

A la surface des corps sans atmosphère tels que les satellites, le comportement photométrique dépend à la fois de la nature du régolithe, c'est à dire de la couche de surface composée de débris fragmentés et brisés en raison du bombardement météoritique, et aussi des régions ayant subies un "resurfacing", résultat d'une activité interne intense. En effet, contrairement au diffuseur de Lambert qui réfléchit la totalité de la lumière par sa surface, dans

le cas des diffuseurs réels, la lumière pénètre toujours dans la matière où elle se trouve absorbée et diffusée pour être finalement réémise à la surface du corps.

Il existe deux types de loi de diffusion en photométrie planétaire: Des lois empiriques et des lois partant de la physique du problème.

Parmi les lois empiriques citons:

- *La loi de Lambert* applicable aux diffuseurs parfaits et qui constitue une bonne approximation pour les surfaces très brillantes mais qui ici est particulièrement inadaptée.

- *La loi de Minnaert* (1941) à deux paramètres dont un paramètre d'assombrissement de limbe, caractéristique de la variation de lumière centre-bord, et qui est encore très utilisée en raison de sa formulation simple et d'une bonne adéquation avec le comportement photométrique des surfaces des satellites (et même des planètes). Seulement, ces paramètres dépendent de l'angle de phase et n'ont aucune interprétation physique simple.

Quant aux lois intégrant les effets physiques du régolithe, elles prennent toutes leur source à partir de l'équation du transfert radiatif de Chandrasekhar (1960). Il en va ainsi de :

- *La loi de Lommel-Seeliger* obtenue en supposant une diffusion interne isotrope et qui s'applique aux corps de type lunaire tels que Callisto et même Ganymède en la modifiant légèrement à l'aide d'une fonction de rétrodiffusion particulière (Irvine, 1966).

- *La loi de Hapke* (1986) qui rend compte de manière plus réaliste des effets physiques dûs à la microstructure, à la rugosité à large échelle, à la porosité du régolithe...

Nous avons essentiellement travaillé avec les lois comportant des paramètres qui rendent ainsi possible un ajustement à l'observation, ce qui est le cas des lois de Minnaert et de Hapke.

L'effet principal de la diffusion de la lumière par la surface des satellites amplifié par l'existence d'une phase est d'entraîner un décalage en position du photocentre par rapport au centre du satellite. Une bonne approximation de ce décalage peut être donnée en valeur absolue par (Lindgren, 1977):

$$\delta y = \frac{1}{2} \left(\frac{2k + 1}{2k + 2} \right) \alpha R$$

où k est le paramètre d'assombrissement de limbe de Minnaert compris entre 0.5 (aucun assombrissement de limbe, ce qui est le cas de la Lune et de Callisto) et 1 (fort assombrissement de limbe), α l'angle de phase exprimée en radians et R le rayon du satellite en km.

Ainsi pour Ganymède à la phase maximale (11°) avec un rayon de 2638 km et un coefficient k de 0.54 on obtient un décalage de 190 km soit $0.052''$.

De plus à cet effet conjoint de la phase et du type de diffusion en surface, il faut superposer l'effet dû à la non homogénéité en albédo des surfaces des satellites qui peut produire un décalage supplémentaire du photocentre (il peut atteindre $0.035''$ dans le cas d'Europe (Lindgren, 1977)).

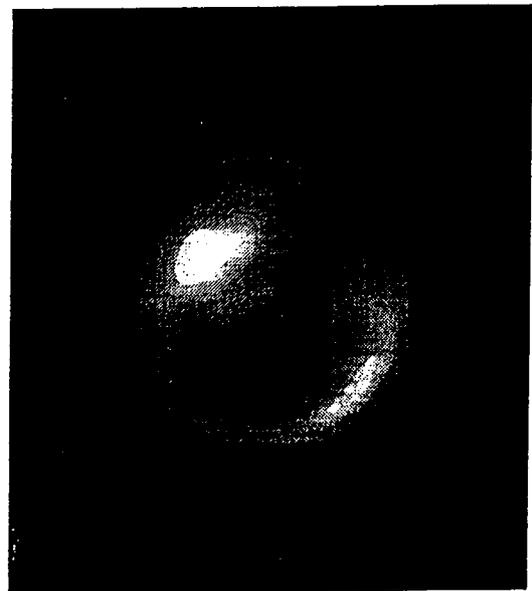
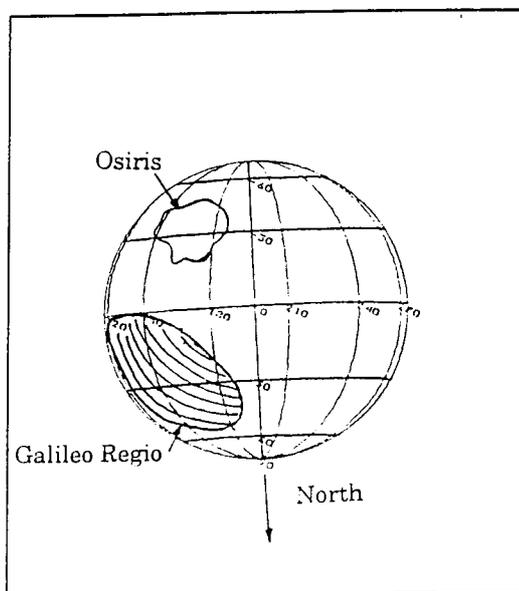


Fig.1: Surface de Ganymede observée le 5 janvier 1990 avec un récepteur CCD au télescope de 1m du Pic-du-Midi (Colas,Lecacheux,Laques)

Ceci est particulièrement bien illustré par La figure 1 qui montre une observation CCD de Ganymède réalisée le 5 janvier 1990 par F.Colas, P.Laques et J.Lecacheux au télescope de 1m du Pic du Midi. On y distingue nettement une grande zone sombre, Galileo Regio, ainsi que des tâches brillantes dont Osiris, système à ejecta rayonnant résultant d'un impact d'un noyau cométaire de 10km de diamètre sur une surface recouverte de glace.

Finalement, l'effet global dû à la photométrie des surfaces des satellites galiléens peut atteindre près de $0.1''$ d'arc. Un tel effet, pour être étudié, exige l'utilisation d'observations très précises. C'est pourquoi, les phénomènes mutuels des satellites galiléens sont tout à fait adaptés à cette étude.

3 - Observation et réduction d'un phénomène mutuel .

3.1 Observation.

Les phénomènes mutuels sont dus aux positions relatives que prennent le Soleil, la Terre et deux satellites. Ces phénomènes, contrairement aux phénomènes classiques (éclipses ou occultations par la planète) qui ont lieu en permanence, ne se produisent que tous les six ans. L'absence d'atmosphère autour des satellites galiléens permet de s'affranchir des effets liés à la diffusion et à la réfraction de la lumière lors de la traversée de l'atmosphère. Ils constituent donc des observations tout à fait précises et c'est la raison pour laquelle ils sont astrométriquement très intéressants.

Lors d'une occultation mutuelle ou d'une éclipse mutuelle, on observe une variation de la luminosité du satellite occulté ou éclipsé du au passage devant celui-ci du disque du satellite occultant ou de l'ombre du satellite éclipsant. C'est l'observation de cette variation d'éclat qui fournit des renseignements intéressants. La donnée utile pour l'astrométrie est la forme de la courbe de lumière et la date correspondant au minimum de distance entre les deux satellites qui est proche de la date du minimum de lumière. Cette date est calculable par la théorie et dépend des positions respectives des satellites. L'écart entre la prédiction et l'observation sera utilisé pour corriger le modèle théorique.

Cependant, même si la plupart des courbes de lumière ont des formes relativement symétriques, certaines présentent au contraire des dissymétries, des accidents ou des paliers dus précisément aux effets combinés de la diffusion de la lumière en surface, de la phase et des zones d'abédos différents.

Comme on l'a fait remarquer précédemment , ces effets ont pour principale conséquence de provoquer un décalage entre le photocentre et le centre de gravité du satellite c'est-à-dire que la date du minimum de lumière pourra s'écarter assez sensiblement de la date du minimum de distance. Afin donc de réduire correctement ces courbes de lumière particulières, il est nécessaire de procéder à une modélisation .

Des travaux ont déjà été menés au Bureau des Longitudes afin de prévoir les chutes en magnitudes des courbes de lumières des phénomènes mutuels (Morando, 1985,1986). Un algorithme complet de modélisation a été développé (Thuillot et Morando, 1990). Enfin, les dernières améliorations ont été permises par l'introduction de lois de diffusion plus complexes que celles utilisées jusqu'alors ainsi que par une modélisation du flux thermique dans l'infrarouge en provenance des sources chaudes de Io. Ceci a permis de procéder aux premiers ajustements de courbes de lumières observées en 1985 ainsi qu'à celui d'une observation infrarouge de 1991.

3.2 Résultats.

A partir de l'ajustement par moindres carré de plusieurs phénomènes mutuels de 1985 (occultations et éclipses), les résultats suivants ont été obtenus (Descamps et Thuillot,1992): Outre l'obtention de résidus astrométriques très précis, une première détermination des paramètres de Hapke et de Minnaert pour les surfaces des quatres satellites galiléens a permis la prédiction de la forme des courbes de lumières des phénomènes de 1991 (Thuillot et Descamps, 1990).

La figure 2 présente l'occultation de Io par Europe du 2 janvier 1991 faite au Pic du Midi par F.Colas, J.Lecacheux, P.Laques et J.Berthier ainsi que la courbe de lumière prédite.

On vérifie le bon accord entre la prédiction et l'observation, notamment par la présence d'un palier près du maximum de chute en magnitude.

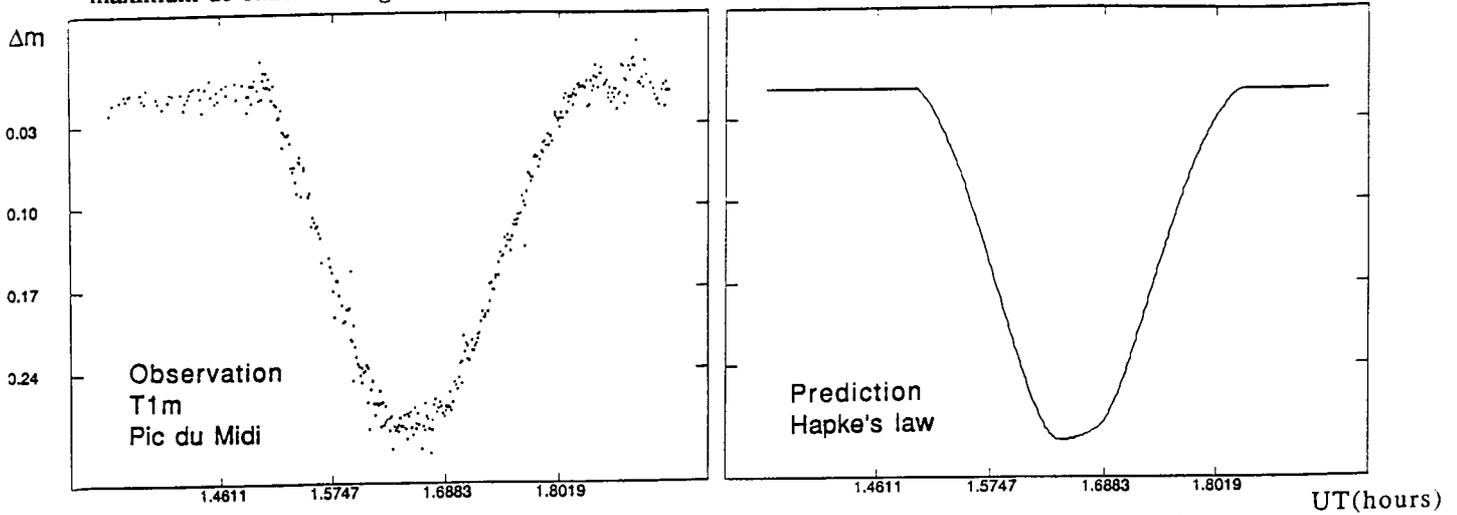


Fig.2: Occultation annulaire de Ganymède par Europe le 2 janvier 1991 (Colas, Lecacheux et Berthier)

3 - Observations infrarouges de Io

On sait depuis 1979, grâce aux sondes spatiales Voyager 1 et 2, que Io, le premier satellite galiléen de Jupiter, possède une activité volcanique très importante. Plusieurs "hot spots" et neuf volcans en activité ont été découverts par le spectrophotomètre infrarouge IRIS. Ces volcans, particulièrement actifs dans une bande spectrale allant de $4\mu m$ à $10\mu m$ peuvent être détectés lors de phénomènes mutuels. D'autant plus que la température de la surface étant de l'ordre de 130K, celle-ci émet surtout à partir de $10\mu m$ et apparaît donc comme éteinte dans les bandes citées précédemment.

En effet, lors d'une occultation mutuelle, quand un volcan est occulté, on constate alors une chute brutale de flux sur la courbe de lumière du phénomène. Ce type d'observation est donc d'une précision particulièrement élevée en raison de la finesse des détails à la surface de Io que constituent les volcans dont la position est bien connue à mieux de 60km.

La figure 3 présente une observation réalisée le 20 février 1991 au télescope de 1m de l'ESO à $3.8\mu m$.

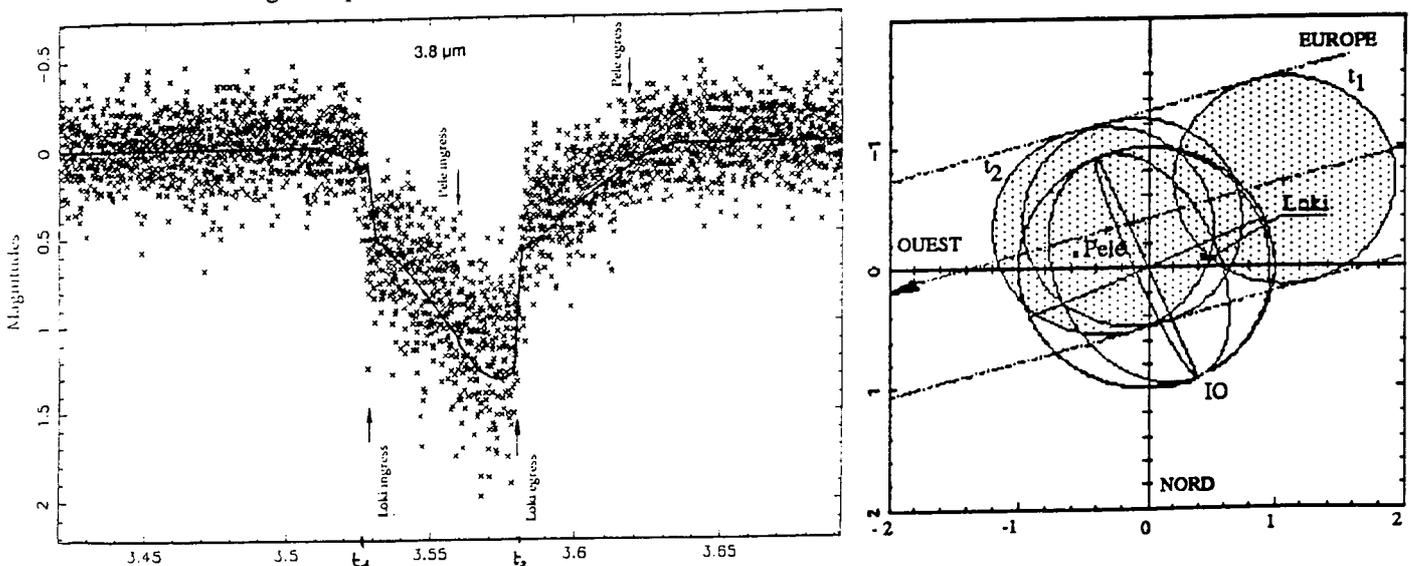


Fig.3: Occultation de Io par Europe à $3.8\mu m$ le 20 février 1991 à l'ESO. La courbe en traits pleins représente le modèle ajusté sur l'observation (croix). Les brusques variations en magnitude correspondent à la disparition et à la réapparition de Loki.

la configuration géométrique tracée est déduite de l'ajustement des positions relatives des satellites à partir de la courbe de lumière observée.

On relève sur la courbe de lumière du phénomène une variation brusque en flux aux instants t_1 et t_2 qui correspond à l'occultation par Europe de Loki situé à 312° de longitude et à 7° de latitude nord. L'amplitude et la

durée de la chute en magnitude au moment de la disparition et de la réapparition de Loki derrière le limbe d'Europe ont permis la détermination de ses caractéristiques physiques (Descamps et al.,1992).

Il a ainsi été possible d'estimer sa température à 355 K et son diamètre à 140 Km indiquant une résolution atteinte de 0.048 arcsec, nettement supérieure à la résolution théorique de 0.95 arcsec correspondant à un télescope de 1m d'ouverture à $3.8\mu\text{m}$ (critère de Rayleigh). Une autre observation d'un phénomène mutuel impliquant également Europe et Io et faite au Japon à $2.2\mu\text{m}$, a révélé, pour la première fois à cette longueur d'onde, la présence d'une source chaude. Celle-ci, déjà détectée dans d'autres types d'observations, n'était pas encore localisée de manière précise. Même si la signature de cette source sur la courbe de lumière est moins évidente qu'à $3.8\mu\text{m}$, il fut possible néanmoins d'en préciser la position ainsi que sa température et son diamètre (Souchay et al.,1992).

Conclusion

Grâce à une modélisation des effets de la surface sur la réflexion-diffusion de la lumière solaire, il a été possible de séparer la composante photométrique de la composante astrométrique dans la réduction des courbes de lumière des phénomènes mutuels.

Les principaux résultats à attendre sont non seulement l'obtention des paramètres de surface des satellites galiléens, par une méthode tout à fait originale qui intéresse photométristes et planétologues mais surtout l'espoir d'obtenir une précision accrue dans la réduction de ce type d'observations.

Un nouvel ajustement des constantes de la théorie des mouvements des satellites à l'aide de ces observations plus précises permettrait d'obtenir une précision du modèle dynamique meilleure que 0.01" d'arc (soit environ 40km).

Avec une telle précision de la théorie, une mise en évidence des effets dynamiques non gravitationnels faibles, tels qu'une accélération séculaire supposée de Io (Lieske, 1987), est rendue possible. La connaissance de celle-ci devrait permettre de trancher sur le type d'évolution future du système galiléen, c'est-à-dire confirmer ou non l'hypothèse faite d'un éloignement progressif de Io par rapport à Jupiter par effet de marée pour atteindre la commensurabilité 2:1 avec Europe.

Références.

Arlot J.E., 1982. *Astron.Astrophys.*107,305.

Aksnes K., Franklin F., Magnusson P., 1986. The longitude discrepancy for mutual satellite phenomena resolved. *Astron.J.*,92,1436. *Icarus*,55,93-110.

Chandrasekhar S., 1960. *Radiative transfert*, Dover, New York.

Descamps P., Thuillot W., 1992. Surface parameters of the Galilean satellites from an astrometric analysis of observations of their mutual events. soumis à *Icarus*.

Descamps P., Arlot J.E., Colas F., Thuillot W., Bouchet P., Hainaut O., 1992. Observation of the volcanoes of Io, Loki and Pele, made in 1991 at ESO during an occultation by Europa. soumis à *Icarus*.

Hapke B.W., 1986. Bidirectional reflectance spectroscopy.IV. The extinction coefficient and the opposition effect. *Icarus*,67,264-280.

Irvine W., 1966. The shadowing effect in diffuse reflectance. *J.Geophys.Res.*, 71, 2931-2937.

Lieske J., 1980. *Astron.Astrophys.*, 82, 340.

Lieske J., 1987. Galilean satellite evolution. observational evidence for secular changes in mean motion. *Astron.Astrophys.*, 173, 146.

Lindegren L., 1977. Meridian observations of planets with a photometric multislit micrometer. *Astron. Astrophys.*, 57, 55.

Minnaert M., 1941. The reciprocity principle in lunar photometry. *Astrophys.J.*,93, 403-410.

Morando B., 1985. Modèle pour une éclipse d'un satellite galiléen par un autre. *Note technique PHEMU85 n°20*, Bureau des Longitudes, Paris.

Morando B., 1986. *Supp. Ann. Phys.*, **12**, 139.

Souchay J., Hiromoto N., Takami T., Nakamura T., Descamps P., Aruga T., 1992. Galilean satellites observations at $2.2\mu m$. *Astron. Astrophys.* (sous presses)

Thuillot W., Morando B., 1990. Modélisation de courbes photométriques de phénomènes mutuels des satellites galiléens de Jupiter. *Notes scientifiques et techniques du Bureau de Longitudes, Paris, S030.*

Thuillot W., Descamps P., 1990. A model for lightcurves of the mutual phenomena. Proceedings of the PHEMU91 WORKSHOP, 6-7 nov 1990, 61-70. Arlot et Burchi ed.

Il est à noter que toutes les observations réduites sont disponibles sur supports magnétiques (bandes ou disquettes Macintosh et PC) sur simple demande.

2- Bilan de la campagne PHEMU91

En 1991, il y a eu 328 observations de 105 phénomènes à partir de 37 sites principaux plus également une dizaine d'observations réalisées par des amateurs. Pour la campagne PHEMU85 les observations étaient limitées à trois types: AVIA (photométrie bidimensionnelle), PHOTOMETRIE et VISUEL, mais pour la campagne PHEMU91 les observations ont été de cinq types: AVIA, PHOTOMETRIE, VISUEL, PHOTOMETRIE INFRAROUGE et CCD. (Table I)

CAMPAGNES D'OBSERVATIONS DES PHENOMENES MUTUELS DE JUPITER

	1985		1991
AVIA	: 19	AVIA	: 75
PHOTOMETRE	: 112	PHOTOMETRE	: 192
VISUEL	: 35	VISUEL	: 38
		CCD	: 15
		INFRA-ROUGE	: 8
TOTAL	: 166	TOTAL	: 328

COMPARAISON DES SITES ENTRE 1985 ET 1991

1985		1991	
BARCELONE (SPA)		AST. SOC. OF LONG ISLAND (USA)	
BORDEAUX (FRA)		BARCELONE (SPA)	
BRASOPOLIS (BRA)		BARI (ITA)	
CASES-NOVES (SPA)		BELGRADE (YUG)	
CATANIA (ITA)		BELGRADCEIK (BUL)	
GRASSE (FRA)		BERLIN (GER)	
COVO (ITA)		BORDEAUX (FRA)	
GRANADA (SPA)		BRASOPOLIS (BRA)	
JUNGFRAU (SWI)		BREISGAU (GER)	
LA SILLA (CHI)		BUCAREST (ROM)	
MASSA (ITA)		CANARIES (SPA)	
MEUDON (FRA)		CLUJ-NAPOCA (ROM)	
MOLLET (SPA)		COM. RES. LAB. (JAP)	
MC-CHIRAN (FRA)		DEVON AST. OBS. (CAN)	
ORP (FRA)		ESSEN (GER)	
PARIS (FRA)		GRASSE (FRA)	
PIC DU MIDI (FRA)		HAWAI (USA)	
SAMPSOR (SPA)		JUNGFRAU (SWI)	
TERAMO (ITA)		KAKUDA (JAP)	
ZOETEMER (NED)		KAVALUR (IND)	
		LA PRIMAUDIÈRE (FRA)	
		LA SILLA (CHI)	
		MEUDON (FRA)	
		MILANO (ITA)	
		NEKAAL (USA)	
		NICE (FRA)	
		ORP (FRA)	
		PARIS (FRA)	
		PIC DU MIDI (FRA)	
		REGIO DE CALABRE (ITA)	
		REUX (BEL)	
		RIO DE JANEIRO (BRA)	
		SIDING SPRING (USA)	
		TERAMO (ITA)	
		TIMISOARA (ROM)	
		ZOETEMER (NED)	
TOTAL = 20		TOTAL = 37	

Il faut ajouter à cette liste quelques amateurs (environ une dizaine

Table I

A l'heure actuelle, nous avons reçu 116 fichiers qui sont en cours de réduction. L'analyse de plusieurs courbes infrarouges réalisées pendant des observations faites à l'ESO a déjà permis d'aboutir à un résultat important, la détection de deux volcans de IO et leur localisation très précise (Descamps et al, 1992). François Colas et Jérôme Berthier (Berthier, 1991) pour leur part ont contribué à l'acquisition et à la réduction des observations CCD. Ces nouveaux types d'observations ont engendré des problèmes de traitement et de réduction que nous n'avions pas connus précédemment.

3- Rappel des réductions

Un certain nombre de programmes ont encore été nécessaires pour transformer les données brutes en données standards pouvant être exploitées par les programmes déjà existants; en effet, les techniques et les matériels ayant évolués au cours des six années séparant les deux dernières campagnes, les mêmes observatoires ou observateurs ont fait parvenir leurs données sous des formes différentes de la campagne précédente.

Le programme principal de traitement utilisé en 1985 ne tenait compte que des fonds de ciel qui étaient extraits des flux enregistrés, mais n'utilisait pas les objets de référence car ils n'étaient pas souvent présents. Pour la campagne 1991, l'expérience aidant, ces objets de référence ont été pratiquement systématiquement observés et le programme va donc être modifié en conséquence afin d'améliorer la qualité des résultats. (fig. 2)

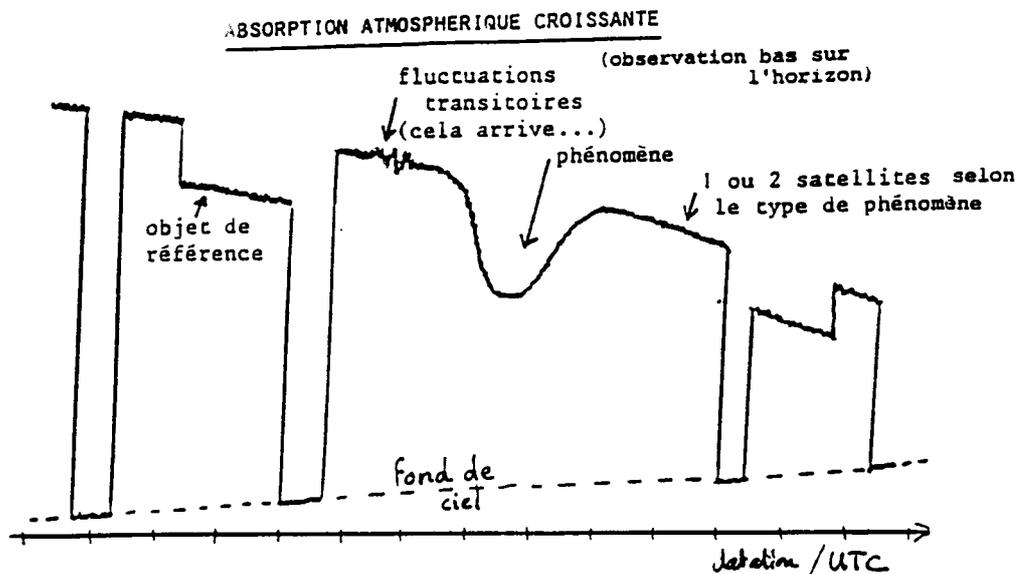


fig. 2 Exemple de mesures standards pendant l'observation d'un phénomène mutuel

4- Problèmes spécifiques

Comme nous l'avons vu précédemment, les nouveaux types d'observations nous ont posés des problèmes auxquels nous n'avons pas l'habitude d'être confrontés. Pour l'Infrarouge par exemple, une courbe de l'ESO notamment avait des valeurs de flux inférieures au fond de ciel (fig. 3); ce qui posait des problèmes de réduction car le programme n'envisageait pas ce genre de phénomènes, peu courant il est vrai. Nous avons donc contacté l'ESO pour avoir une explication à cet état de fait mais, malheureusement, la réponse qui nous a été faite est assez obscure. Cela pourrait être dû à un bruit très important.

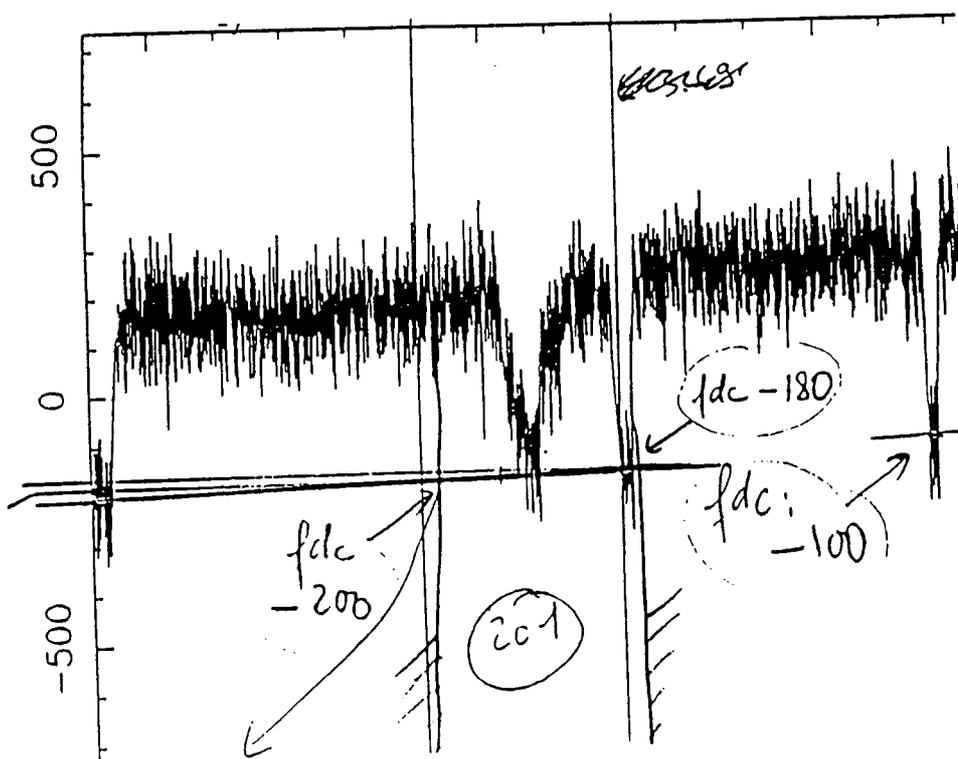


fig.3 Courbe Infrarouge de l'ESO dont certaines valeurs sont inférieures au fond de ciel

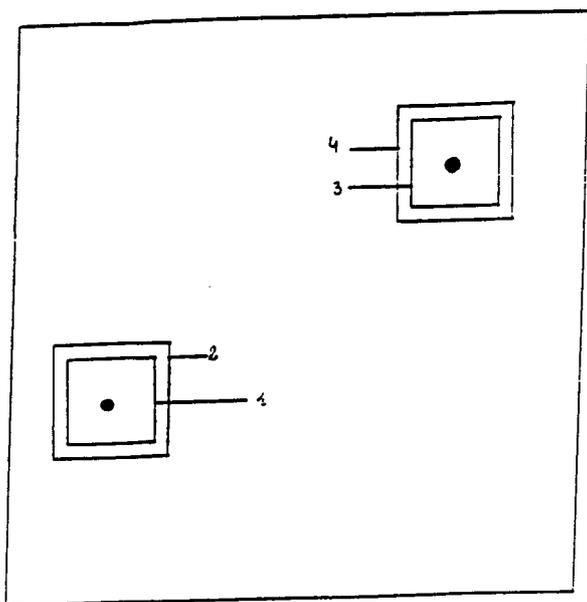
Pour ce qui est des observations AVIA, il a fallu réaliser des mesures photométriques dans plusieurs fenêtres en même temps (fig. 4)

On en tire plusieurs courbes:

- L'objet observé (fig 5.a)
- Le ciel de l'objet observé (fig 5.b)
- L'objet de référence (fig 5.c)
- Le ciel de l'objet de référence (fig 5.d)

ensuite:

- le flux de l'objet observé moins son fond de ciel (fig 5.e)
- le flux de l'objet de référence moins son fond de ciel (fig 5.f)
- et enfin, la courbe définitive, flux objet moins son fond de ciel sur flux référence moins son fond de ciel (fig 5.g)



- FENETRE 1: OBJET OBSERVE
- FENETRE 2 - FENETRE 1: FOND DE CIEL AUTOUR DE L'OBJET OBSERVE
- FENETRE 3: OBJET DE REFERENCE
- FENETRE 4 - FENETRE 3: FOND DE CIEL AUTOUR DE L'OBJET DE REFERENCE

fig. 4 exemple de fenêtrage AVIA

TWO-DIMENSIONAL OBSERVATION OF A MUTUAL ECLIPSE
MEUDON OBSERVATORY I-BAND
J1 eclipses J2 on April 22, 1991

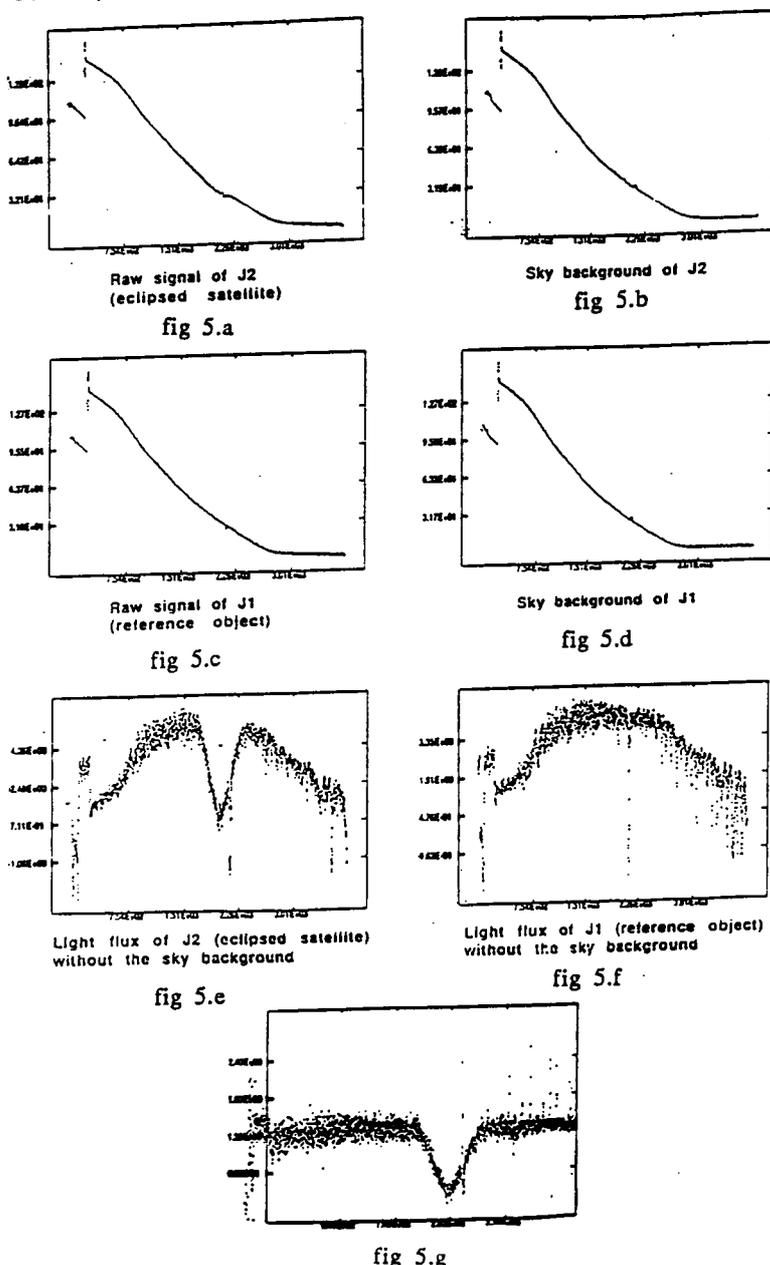


fig.5 combinaisons des courbes AVIA obtenues pour une observation faite dans le crépuscule

Pour le CCD, la technique est à peu près la même que pour AVIA, mais le nombre de points obtenus est nettement inférieur car l'enregistrement est en parti manuel et le temps d'acquisition des images est plus long (fig. 6)

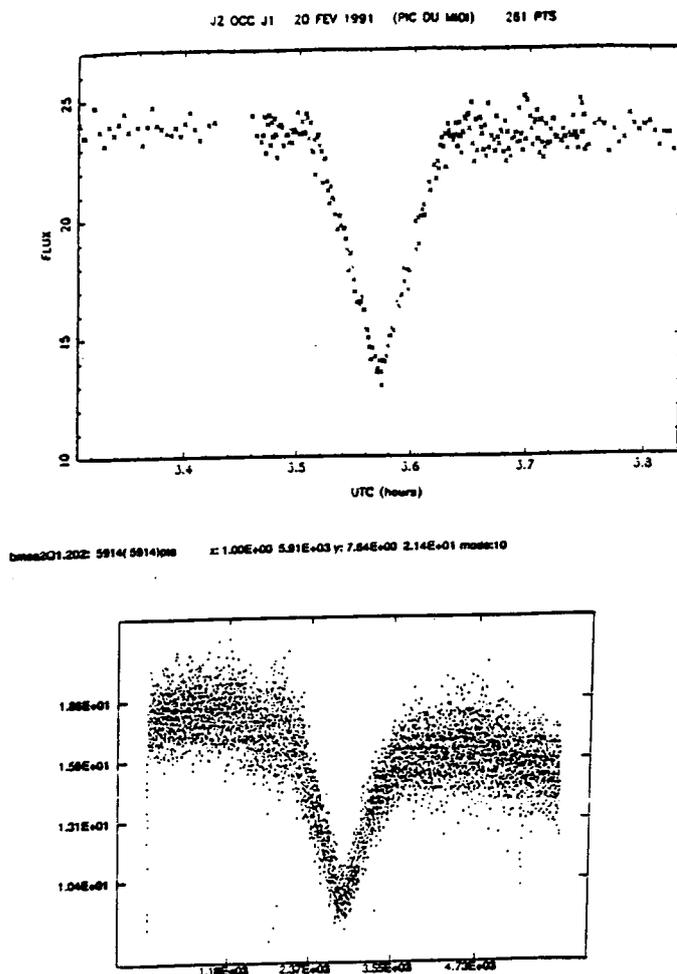


fig. 6 comparaison du nombre de points entre le CCD (en haut) et AVIA (en bas) obtenus pour une même observation

5- Problèmes d'étalonnage

Pour les observations CCD, on se sert, pour dater les images, de l'horloge de l'ordinateur, mais celle-ci n'est pas toujours très stable et il faut donc trouver une solution plus régulière. Pour cela on date à l'aide de l'horloge parlante un certain nombre d'images et ensuite, on utilise une régression linéaire qui permet de rattraper la dérive éventuelle due à l'instabilité des horloges ordinateurs. Ce type de problème se retrouve également dans le cas des observations AVIA.

Pour ce qui est des autres types d'observations, les ennuis viennent plutôt de leur imperfection, par exemple, nous avons reçu d'un observateur des données sous la forme suivante: un fichier commentaire contenant des informations permettant de dater les courbes, trois fichiers de données. Dans le fichier commentaire, il y avait pour deux fichiers:

L'heure de début d'enregistrement et la valeur du flux du premier enregistrement
L'heure de fin d'enregistrement et la valeur du flux du dernier enregistrement
Le nombre de points du fichier.

et pour le troisième fichier:
la date début d'enregistrement et le pas d'intégration

Cette hétérogénéité nous a obligé à construire deux programmes pour un seul observateur et en plus à l'utilisation, si pour deux fichiers, les informations étaient correctes, pour l'un d'eux, nous nous sommes aperçu qu'elles étaient complètement erronées: en effet, les valeurs de flux indiquées ne correspondaient pas aux enregistrements indiqués et en plus le nombre de points était également faux. C'est le genre de situation qui risque de se retrouver le plus souvent dans l'avenir.

En conclusion, la campagne PHEMU91 nous promet plus de résultats car il y a eu plus d'observations et plus de sites, mais cette multiplicité risque aussi d'engendrer plus de problèmes.

Références:

- Arlot, J.-E., W. Thuillot, J. Barroso Jr, L. Bergeal, C. Blanco, R. Boninsegna, P. Bouchet, J. Bourgeois, D. Briot, H. Bulder, R. Burchi, J. A. Cano, F. Colas, V. D'Ambrosio, A. Di Paolantonio, G. Dourneau, M. Dumont, S. Ferrand, A. Figer, G. Francou, M. Froeschlé, J.M. Gomez-Forellad, C. Gouiffes, G. Helmer, F. J. Jablonsky, P. Laques, J.-F. Le Campion, J. Lecacheux, J.-M. Lecontel, J. Manfroid, C. Meyer, B. Morando, J.-C. Valtier, D.T. Vu, and J.-D. Wahiche.:1992, A catalogue of the observations of the mutual phenomena of the galilean satellites of Jupiter made in 1985 during the PHEMU85 Campaign. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 92, 151.
- Berthier, J.: 1991, Réduction des observations des phénomènes mutuels des satellites galiléens de Jupiter obtenues par caméra CCD, Rapport de stage DEA, Observatoire de Paris
- Descamps, P., Arlot, JE, Colas, F., Thuillot, W., Vu, D.T., Bouchet, P., Hainaut, O.: 1992, Observation of the volcanoes of Io, Loki and Pele, made at ESO during an occultation by Europa, *Soumis à Icarus*

OBSERVATIONS DES PHEMUS 91 A LA LUNETTE ARAGO

Bruno Morando

La lunette et le photomètre

La lunette, dite Arago, a été installée sur la tour Est de l'observatoire en 1855. Elle a une ouverture de 38cm et une distance focale de près de 900cm. L'objectif achromatique a été refait en 1883 par les frères Henry. La monture équatoriale à l'allemande a été motorisée en 1919.

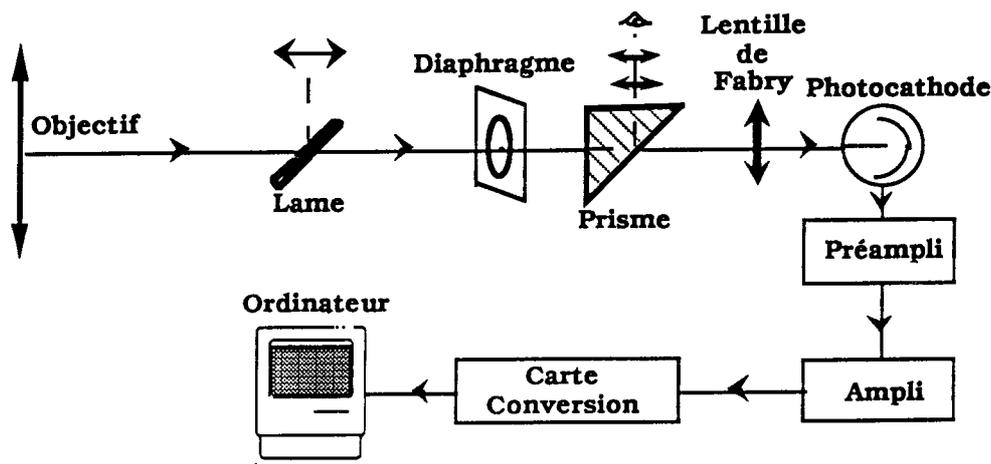


Fig. 1 Principe du photomètre

Le récepteur, déjà utilisé au cours de la campagne PHEMU 85, était un photomètre photoélectrique réalisé par F. Sèvre et R. Vitry, de l'Institut d'astrophysique. Il correspond au schéma de la figure 1. Une lame séparatrice semi-réfléchissante renvoie une partie du faisceau lumineux sur un oculaire réticulé pour permettre la suivie. On trouve ensuite un diaphragme qui limite le champ à un petit cercle de 43'' sur le ciel, un prisme escamotable permet de renvoyer l'image latéralement pour vérifier avant l'observation que l'objet est bien dans le diaphragme. Enfin une lentille de Fabry forme l'image de l'objectif de la lunette sur la photocathode du photomultiplicateur.

Le photomultiplicateur a pour référence RCA 4840. Il est sensible aux longueurs d'onde comprises entre 350 nm et 750 nm environ, donc dans le visible et le très proche infrarouge. Suivent un préampli et un ampli classiques. Le signal est ensuite digitalisé et envoyé sur un micro-ordinateur Attari 512 où il est stocké sous forme d'un fichier d'*integers* qui représentent les intensités lumineuses reçues intégrées tous les dixièmes de seconde. Pendant la durée du phénomène la courbe de lumière se dessine sur un écran de contrôle. Un bouton poussoir permet à l'un des observateurs d'envoyer à l'ordinateur une impulsion correspondant aux tops de l'horloge parlante.

Observations faites pendant la campagne

L'équipe d'observateurs était formée principalement de F. Colas, L. Fairhead et de moi-même ainsi que d'étudiants du DEA de l'observatoire : J. Berthier, D. Hestroffer, D. Steichen. Les observations ont débuté à la fin de décembre 1990 et ont duré jusqu'en juin 1991. Il y eut ensuite un dernier phénomène isolé à la fin de septembre. La plupart des phénomènes bien observables, une quarantaine environ, étaient cependant regroupés entre janvier et avril. Les conditions météorologiques nous ont permis d'enregistrer huit bonnes courbes de lumière. L'une d'elles est donnée sur la figure 2.

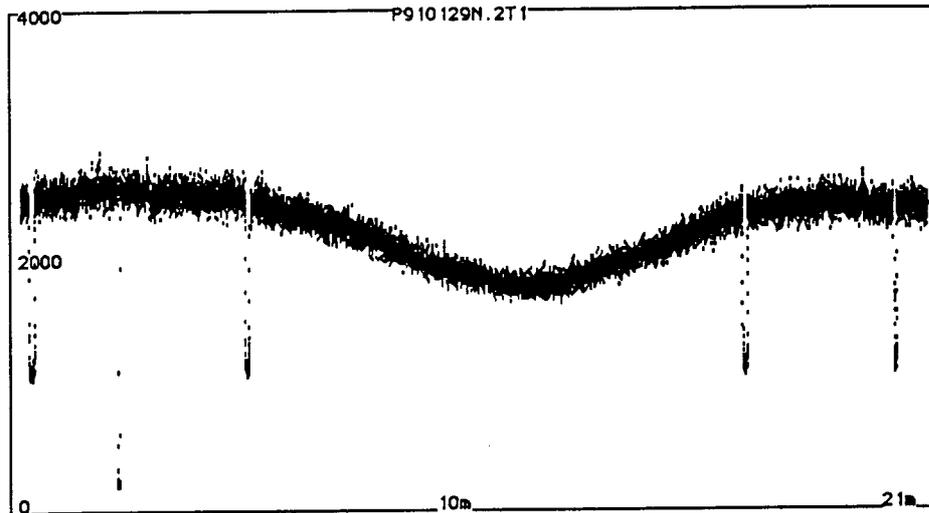


Fig. 2 Phénomènes du 29 janvier 1991

On a enregistré simultanément ce jour là une occultation puis une éclipse de Io par Europe. Les traits verticaux avant et après le minimum sont des enregistrements du fond du ciel obtenus en dépointant l'instrument pendant de courts instants.

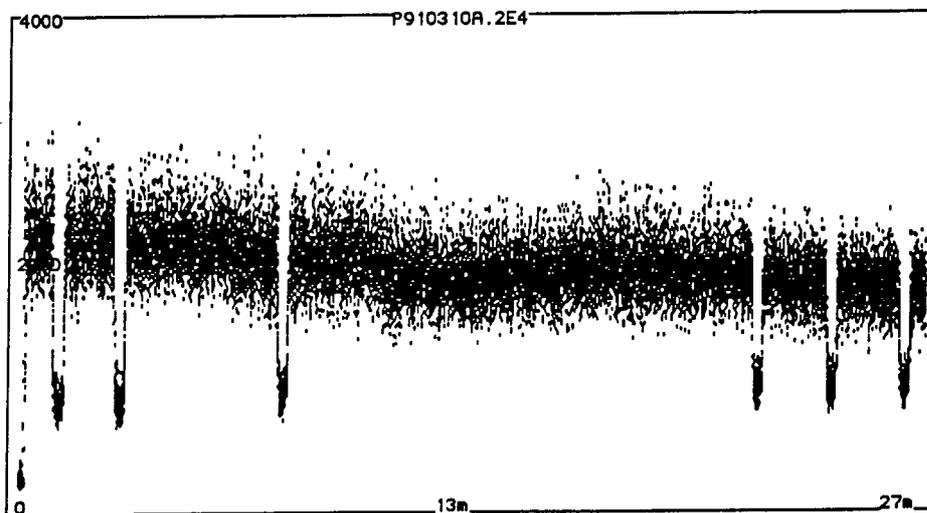


Fig. 3 Eclipse de Callisto du 10 mars 1991

Le phénomène montré sur la figure 3 est particulièrement intéressant. Jupiter était à une hauteur au dessus de l'horizon inférieure à 10° et descendait rapidement. Le fond de ciel augmente puisqu'on s'approche de l'horizon, très éclairé à Paris, et l'éclat du satellite diminue globalement puisque l'absorption augmente. Par ailleurs le bruit

est très important. Cependant le phénomène est bien visible et l'observation est tout à fait utilisable, d'autant plus que c'est la seule qui ait été obtenue de ce phénomène.

Réduction des observations

Les observations sont en cours de réduction. On a d'abord calibré l'échelle de temps en comparant les numéros d'enregistrement de l'ordinateur définis en fonction de son horloge interne avec les enregistrements des tops de l'horloge parlante.

Il a fallu ensuite faire les corrections provenant de la variation de l'éclat du fond du ciel pendant la durée du phénomène due principalement à la variation de la hauteur de Jupiter. Pour cela on fait passer une droite par les points correspondants au fond du ciel et on soustrait de la courbe de lumière.

Reste à lisser la courbe obtenue et à la remplacer, au voisinage du minimum par un polynôme du deuxième ou du troisième degré. On en déduira l'instant observé du minimum de la courbe et par conséquent le O-C correspondant.

LE MOUVEMENT CHAOTIQUE DU SYSTEME SOLAIRE

Jacques Laskar

1) Le système séculaire sous formalisme hamiltonien

Une nouvelle formulation des équations du mouvement planétaire a été obtenue en utilisant les coordonnées canoniques héliocentriques de Poincaré (Laskar, 1992a, 1992b). L'utilisation de ces nouvelles variables permet une meilleure compréhension du problème qui se trouve alors entièrement sous le formalisme hamiltonien, ce qui permet aussi une meilleure diffusion des résultats. Le système séculaire peut être défini d'une manière équivalente à celle non canonique, avec l'avantage ici qu'au second ordre, les variations des demi-grands axes sont strictement nulles, ce qui se démontre sans difficulté. Cette formulation ne change cependant sans doute pas la nature des résultats obtenus jusqu'à présent avec des variables non canoniques, et je n'ai pas jugé nécessaire de refaire tous les calculs.

Une première intégration avait été effectuée sur 200 millions d'années dans le passé, en révélant le caractère chaotique du mouvement du système solaire, par le calcul de son exposant de Lyapounov maximal qui atteint 1/5 millions d'années. Ensuite, l'analyse plus détaillée de la solution par la méthode d'analyse en fréquence que j'ai mise au point a permis de montrer que ce comportement chaotique était essentiellement dû à la présence de deux résonances séculaires dans le mouvement des planètes intérieures: $\theta = 2(g_4 - g_3) - (s_4 - s_3)$ and $\sigma = (g_1 - g_5) - (s_1 - s_2)$ (Laskar, 1989, 1990).

L'argument de θ change plusieurs fois de libration à circulation sur les 200 Ma alors que l'argument de σ reste en libration, mais avec une amplitude variable.

Depuis ces premières intégrations, j'ai complété ces calculs par une intégration de 200 Ma dans les temps positifs, ce qui a permis de montrer que ce deuxième argument passait aussi en circulation au bout d'un certain temps. De plus, quand le premier argument passe en circulation, on a une capture temporaire dans une autre résonance, la résonance

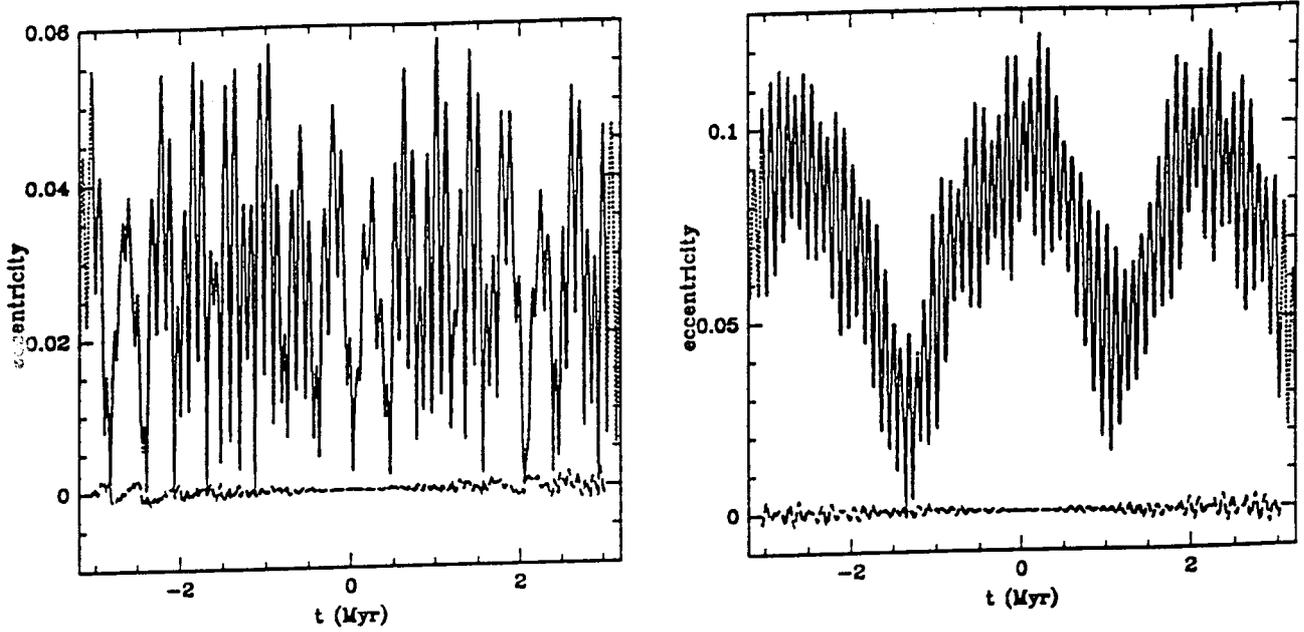


Fig. 1ab. The eccentricity of the Earth (a) and Mars (b) during a 6 Myr timespan centred at the present. The solid line is the QTD6 solution, the dotted line is the La90 solution, and the dashed line is the difference between the two solutions.

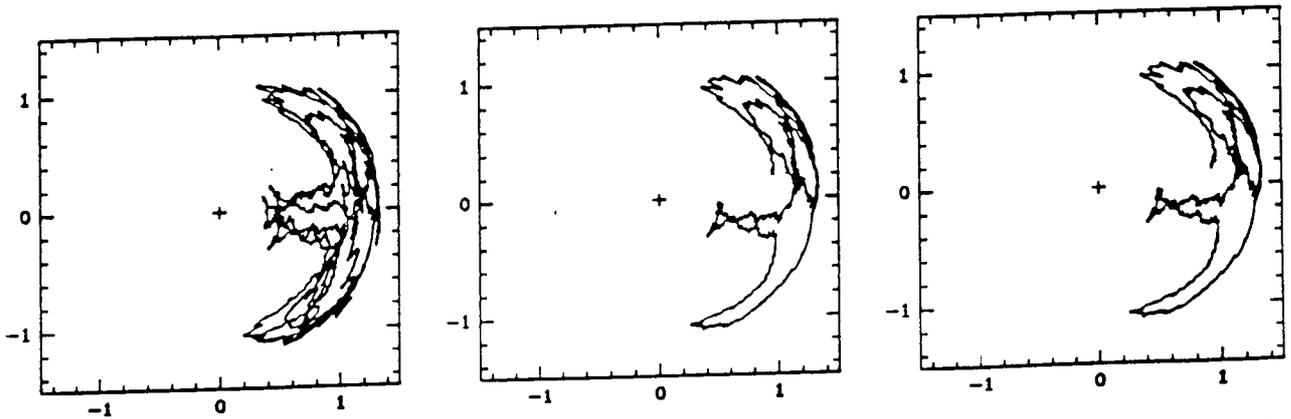


Fig. 2abc. The critical argument of the secular resonance, θ , is plotted in polar coordinates. The first plot is for 15 Myr of the La90 solution. The second plot is for 6 Myr of the La90 solution, and the third plot is for the 6 Myr of the QTD6 solution

$(g_4 - g_3) - (s_4 - s_3)$ ce qui traduit un phénomène de "résonance overlap", décrit par (Chirikov, 1979), et qui explique sans doute la taille relativement importante observée pour la zone chaotique (Laskar, 1992).

2) Confirmation du mouvement chaotique du système solaire

Depuis les premiers calculs effectués sur ce système séculaire, j'avais pu en vérifier la précision grâce à des comparaisons avec l'intégration numérique DE102 du JPL, effectuée uniquement sur 4000 ans environ, ce qui est peu (Laskar, 1986); il est vrai par rapport aux 200 Ma des intégrations. Il faut préciser qu'il n'existait jusqu'à l'année dernière aucune autre intégration numérique, comparable, des équations du mouvement.

L'intégration de Quinn *et al.*(1991), effectuée sur 3 Ma, est ainsi la première sur une telle durée, qui inclue toutes les planètes et des effets moyennisés, de la Lune, et de la relativité générale. Quinn et Tremaine ont ensuite effectué une nouvelle intégration plus précise, sur 6 Ma (QTD6) qu'il a été possible de comparer directement avec la dernière solution La90 que j'avais obtenue (Laskar, 1990).

L'accord entre les deux solutions est surprenant, et les différences sont à peine perceptibles dans les solutions de l'excentricité de la Terre et de Mars sur cette durée (Laskar *et al.*, 1991). Une telle durée de 6 Ma n'est évidemment pas suffisante pour pouvoir détecter l'effet du chaos (l'exposant de Lyapounov n'est que de $1/5$ Ma), mais il a été possible de mettre en évidence l'argument résonant dans la solution numérique QTD6, en confirmant l'existence des résonances séculaires dans le système solaire interne. Un peu plus tard, Sussman et Wisdom ont obtenu une intégration numérique d'un modèle comparable du système solaire sur 100 ma à l'aide d'une nouvelle méthode approchée d'intégration numérique, dérivée des constructions de "mapping de Chirikov". Cette nouvelle intégration a confirmé tous les résultats que j'avais pu obtenir depuis 3 ans sur la nature chaotique du mouvement du système solaire. La valeur de l'exposant de Lyapounov a été confirmée, ainsi que l'existence des deux arguments résonants passant de libration en circulation (Sussman et Wisdom, 1992).

3) L'analyse en fréquence: une nouvelle méthode numérique pour l'analyse des systèmes dynamiques

La méthode numérique d'analyse en fréquence (NAFF) que j'ai mise au point est un nouvel outil très puissant pour l'étude numérique des systèmes dynamiques. Dans le cas du système solaire, cette méthode a permis d'estimer la taille de la zone chaotique dans chacune des 15 directions d'action de l'espace des phases du mouvement (Laskar, 1990). Ensuite, pour montrer tout l'intérêt de cette nouvelle méthode, je l'ai appliquée, en collaboration avec Cl. Froeschlé et A. Celletti, à un problème classique, à seulement 2 degrés de liberté (Laskar *et al.*, 1991), Actuellement, j'ai aussi obtenu avec cette méthode une description numérique globale de la dynamique d'un système à trois degrés de liberté.

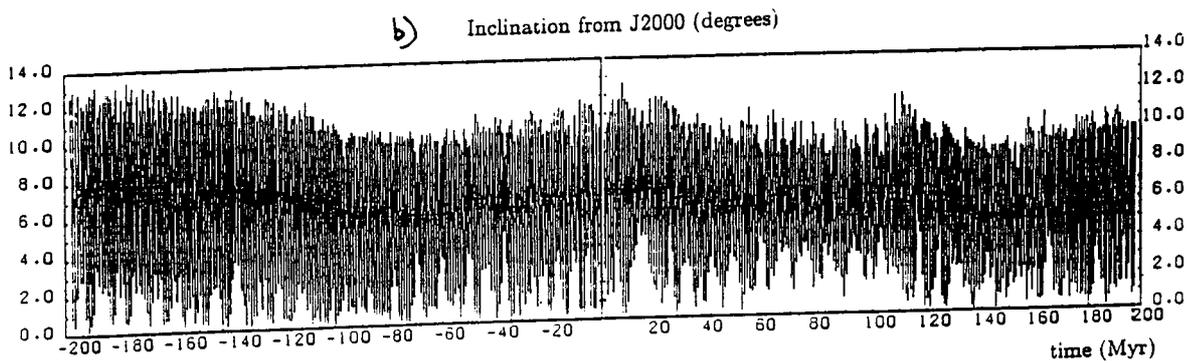
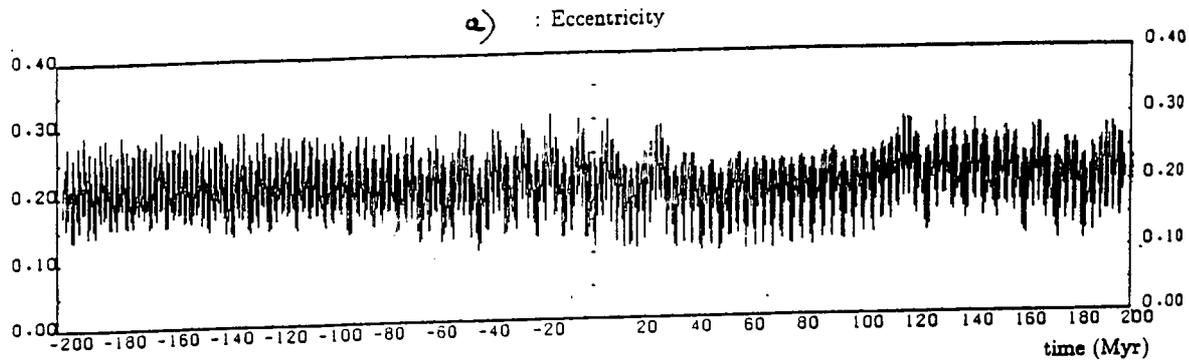


Figure 3. Mouvement chaotique de la planète Mercure.

Mercure est la planète du système solaire pour laquelle l'effet de la dynamique chaotique est le plus spectaculaire. Sur ces courbes sont tracées les variations de l'excentricité (a) et de l'inclinaison (b) en fonction du temps de -200 à +200 millions d'années. Sur chacune de ces courbes on peut voir deux sortes de variations: une variation relativement rapide, avec des périodes de l'ordre de 100 000 ans qui correspond à la partie linéaire de la solution (du type de celle de Laplace), et une variation beaucoup plus lente, qui traduit l'effet du mouvement chaotique. Cette variation atteint sur cette durée 0.05 pour l'excentricité de Mercure et plusieurs degrés pour son inclinaison. Beaucoup plus important, alors que les variations périodiques de la solution de Laplace sont bornées sur un temps infini, nous ne connaissons pas actuellement les limites des variations possibles de l'excentricité et de l'inclinaison des planètes sur une durée de 5 milliards d'années, comparable à l'âge du système solaire.

(Laskar, 1992b)

et, en collaboration avec S. Dumas, de l'université de Cincinnatti, nous appliquons, dans un premier temps, la méthode à l'analyse de la dynamique des accélérateurs de particules.

References

- Chirikov, B.V.: 1979, 'A universal instability of many-dimensional oscillator systems', *Phys. Reports* **52**, 265
- Laskar, J.: 1986, Secular terms of classical planetary theories using the results of general theory, *Astron. Astrophys.* **157**, 59-70
- Laskar, J.: 1989, A numerical experiment on the chaotic behaviour of the Solar System *Nature*, **338**, 237-238
- Laskar, J.: 1990, The chaotic motion of the solar system. A numerical estimate of the size of the chaotic zones, *Icarus*, **88**, 266-291
- Laskar, J.: 1992a, Analytical framework in Poincaré variables for the motion of the solar system, in *Predictability, Stability and Chaos in n-body Dynamical Systems*, A. Roy, ed.
- Laskar, J.: 1992b, A few points on the stability of the solar system, in Symposium IAU 152, S. Ferraz-Mello ed. , (à paraître)
- Laskar, J., Quinn, T., Tremaine, S.: 1991, Confirmation of Resonant Structure in the Solar System, *Icarus* **95**, 148-152
- Laskar, J., Froeschlé, Cl., Celletti, A.: 1992 The Measure of Chaos by the Numerical Analysis of the Fundamental Frequencies. Application to the Standard Mapping., *Physica D*, *in press*
- Quinn, T.R., Tremaine, S., Duncan, M.: 1991, 'A three million year integration of the Earth's orbit', *Astron. J.* **101**, 2287-2305
- Sussman, G.J., & Wisdom, J.: 1992, in Symposium IAU 152, S. Ferraz-Mello ed. , (à paraître)

ETUDE DE LA STABILITE D'UN SYSTEME A DEUX PLANETES

Philippe Robutel

Cette étude traite, dans un premier temps, du cas de Jupiter et Saturne, problème important pour l'étude de la stabilité du système solaire dans son ensemble. En effet, ces deux corps forment l'essentiel de la masse des planètes, et leur mouvement conditionne la marche général du système solaire. Dans ces conditions, une forte irrégularité de leurs trajectoires entrainerait sans doute un comportement beaucoup plus chaotique de l'ensemble du système solaire. Dans un deuxième temps, elle s'applique à un cadre plus abstrait : celui de deux planètes fictives de masses et de demi grands axes quelconques. L'étude d'un tel problème de trois corps permet une bonne visualisation de l'espace des phases (offrant une compréhension globale du problème) et d'appliquer des théories et des méthodes mathématiques dont l'usage est difficilement envisageable avec un nombre supérieur de planètes. Dans ce qui suit, je présenterai brièvement deux aspects de l'étude du problème : L'étude du système séculaire (du couple Jupiter-Saturne) et l'application de la théorie K.A.M. au problème complet.

Réduction du problème et mise en équation

Les équations des mouvements planétaires sont écrites dans les variables héliocentriques canoniques de Poincaré qui assurent sans doute la formulation la plus élégante du problème. Grâce à la réduction du centre de masse, il est possible de fixer le corps central et de se ramener à l'étude du mouvement de deux planètes autour d'un soleil fixe. Nous obtenons ainsi un problème à six degrés de liberté comportant deux intégrales premières : l'énergie et le moment cinétique. L'invariance du moment cinétique nous permet, quitte à ajouter la constante du moment cinétique dans le hamiltonien, d'éliminer les inclinaisons et les longitudes des nœuds ascendants. Ce qui nous ramène à quatre degrés de libertés avec l'énergie comme intégrale première.

Le problème séculaire.

Pour obtenir le hamiltonien séculaire, il convient d'éliminer, par un procédé canonique du type séries de Lindstedt, les longitudes moyennes de planètes (angles à variation rapide) jusqu'à l'ordre voulu du rapport des masses. Malheureusement, il est impossible d'appliquer un tel procédé en cas de résonance en moyen mouvement, situation d'autant plus critique que le couple Jupiter-Saturne est lui même proche de la résonance (2:-5). Mais, en étudiant la zone de libration de l'argument critique $2\lambda_5 - 5\lambda_6$, on constate que le couple de planètes est situé à l'extérieur de cette zone, toutefois suffisamment proche de la séparatrice pour entrer en résonance après une faible augmentation du rapport des demi grands axes. Pour des valeurs réelles des deux planètes, la normalisation est effectuée à l'ordre deux des masses et jusqu'au degré six des inclinaisons et excentricités afin de tenir compte du "petit diviseur" $(2n_5 - 5n_6)^2$. Nous obtenons ainsi un problème à deux degrés de liberté comportant toujours une intégrale première, le hamiltonien. Pour l'exploration de l'espace des phases dans son ensemble, la méthode d'analyse en fréquence de J.Laskar nous permet d'associer, sur un temps donné, un couple de fréquences à chaque point de l'espace. Si le vecteur fréquence est fixe au cours du temps, ce point de l'espace des phases est situé sur un tore invariant, si au contraire les fréquences varient, nous nous trouvons dans une région d'instabilité.

Mais ces éventuelles régions d'instabilité sont, si le système est suffisamment proche d'un problème intégrable (ce qui semble être le cas), confinées entre deux tores invariants. En effet, le système évoluant sur une surface à trois dimensions, un tore de dimension deux sépare l'espace en deux régions disjointes. L'analyse en fréquence nous permet ici de mettre en évidence de nombreux tores invariants et donc de conclure à la stabilité du problème séculaire sur un temps infini.

Théorie K.A.M. appliquée au problème complet

En 1963 Arnold démontre un théorème de conservation de tores invariants dans un système hamiltonien dégénéré, proche d'un système intégrable. Il l'applique au problème à deux planètes proches du mouvement circulaire (et dans le cas où l'orbite de la planète centrale est infiniment proche de l'étoile centrale) pour obtenir un résultat de stabilité "pour presque toutes" les conditions initiales. Plus précisément, si les masses et excentricités planétaires sont assez faibles, les trajectoires sont pour presque toutes les conditions initiales quasi_périodiques et évoluent sur un tore de dimension quatre. Notons que contrairement au problème séculaire, on ne peut présager de l'avenir d'une orbite n'étant pas portée par une surface invariante. En effet de tels tores, étant de codimension deux, ne peuvent pas séparer l'espace et laissent place à des phénomènes de diffusion.

J'ai, pour ma part, généralisé le résultat de stabilité précédant en montrant qu'il s'appliquait au problème spatial et quelles que soient les valeurs des grands axes (toujours pour de faibles masses excentricités et inclinaisons planétaires). Pour aboutir à ce résultat, il convient de faire subir au hamiltonien du problème réduit quelques transformations canoniques afin qu'il vérifie les hypothèses du théorème d'Arnold. Comme il s'agit d'un théorème de perturbation pour un système dégénéré, nous devons choisir, pour les deux types de variables, une partie non perturbée vérifiant de "bonnes conditions". Nous prendrons pour la partie régulière (angles rapides) la somme de deux problèmes de Képler, et pour la partie dégénéré (angles lents) la composante séculaire d'ordre un des masses du hamiltonien. Il nous suffit même de nous limiter à la forme suivante :

$$H_0 = H_2(\alpha, e, e', \omega, \omega'; C) + H_4(\alpha, e, e', \omega, \omega'; C)$$

où H_2 et H_4 sont respectivement des polynômes de degrés deux et quatre des variables de Poincaré dont les coefficients dépendent des demi grands axes. En effet, une des difficultés est d'obtenir des expressions analytiques exactes du hamiltonien, valables pour tout demi grand axe (nous ne pouvons donc pas, comme on le fait habituellement, développer au voisinage de quantités données). Cette opération est possible à l'aide uniquement de deux coefficients de Laplace. Ainsi défini, H_0 doit vérifier une condition de non dégénérescence. Plus précisément, il doit y avoir bijection entre les fréquences et les tores invariants définis par H_0 . Pour démontrer cette propriété, nous devons réduire le hamiltonien à une forme trivialement intégrable qui nous fournit explicitement l'application fréquence. Cette opération se fait en deux étapes : Tout d'abord, la réduction de la forme quadratique H_2 à une somme de carrés, ce qui revient à diagonaliser une matrice symétrique de manière formelle et surtout dans une base symplectique. En suite, il ne reste plus qu'à réduire H_4 sous forme normale à l'aide d'une transformation de Birckoff. Cette suite de transformations canoniques nous fournit un système de variables angles actions $(\varphi, \varphi', I, I')$ dans lequel H_0 s'écrit :

$$H_0(I, I') = \lambda_1(\alpha, C)I + \lambda_2(\alpha, C)I' + \lambda_{11}(\alpha, C)I^2 + \lambda_{12}(\alpha, C)II' + \lambda_{22}(\alpha, C)I'^2$$

où les λ_i et λ_{ij} dépendent toujours de manière exacte du rapport des demi grands axes α et du module du moment cinétique C . La non dégénérescence de H_0 se traduit simplement par l'inversibilité de l'application fréquences :

$$(I, I') \longmapsto \left(\frac{\partial H_0}{\partial I}, \frac{\partial H_0}{\partial I'} \right)$$

ce qui équivaut à la non nullité du déterminant suivant :

$$D(\alpha, C) = \begin{vmatrix} \lambda_{11}(\alpha, C) & \lambda_{12}(\alpha, C) \\ \lambda_{12}(\alpha, C) & \lambda_{22}(\alpha, C) \end{vmatrix}$$

L'expression littérale de $D(\alpha, C)$ étant extrêmement complexe, il paraît difficile de montrer directement sa non nullité. En revanche, les coefficients de Laplace étant des fonctions bien connues, il est alors aisé de les évaluer et d'obtenir ainsi une vérification numérique de la condition. On en conclut, comme annoncé, la validité du résultat quelques soient les demi grands axes et des valeurs du moment cinétique proches du problème circulaire plan.

Références

- Arnold, V.: 1963, "Small denominators", Rus. Math. Surv., volume 18.
- Laskar, J.: 1989, "Les variables de Poincaré et le développement de la fonction perturbatrice", Notes scientifiques et Techniques du bureau des longitudes S 026.
- Laskar, J.: 1990, "Analytical framework in Poincaré variables for the motion of the solar system", Actes du colloque de Cortina août 1990.
- Poincaré, H.: 1893, "Méthode nouvelles de la mécanique céleste", volume 1.

Relations among Two Formal Canonical Transforms

P.-V. Koseleff

Equipe de calcul formel
Ecole Polytechnique
91128 Palaiseau Cedex

Bureau des Longitudes
44 avenue Denfert Rochereau
75014 Paris, France

Abstract

In this paper, we discuss the relationship between the Dragt-Finn transform and the classical Lie transform introduced by Deprit. The relative performance of the algorithms used for the computations of the transformed functions are compared, and the relation between their generators is given. These generators produce the same transform which insures the construction of the same invariants.

Introduction

Our aim is to consider formal canonical transformations from the Lie algebraic point of view. We consider the two principal transformations that play a important role in the Lie perturbation theory. The Lie transform is the application of a single non-autonomous hamiltonian flow (Deprit transform) and we consider also the composition of successive applications of autonomous flows (Dragt-Finn transform). Both are families of near-identity transformations depending on a small parameter. Both have the advantage of giving explicit changes of variables which preserve the Hamilton's equation of motion. Both can be computed by iteration. In this paper, we have restricted the Hamiltonian to be autonomous, an analytical function of the state variables and a formal series on the small parameter but other cases may be treated.

The Lie transform is generally used in Celestial Mechanics and the factored product generally in optics ([Ste]), plasma physics or molecular vibrational dynamics ([FE]).

Let us consider an autonomous hamiltonian system with n degrees of freedom near an equilibrium point. By a linear transformation, this equilibrium can be taken as the origin of the phase space R^{2n} . Assume that in the coordinates $(p, q) = (p_1, \dots, p_n, q_1, \dots, q_n) = (z_1, \dots, z_{2n})$, one can write

$$h(p, q) = h_0(p, q) + \sum_{n \geq 1} \varepsilon^n h_n(p, q), \quad (1)$$

where ε denotes a small parameter, and the h_i are homogeneous polynomials of degree $i+2$. We can suppose also that the linearized part is the Hamiltonian

$$h_0 = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^n \omega_l (p_l^2 + q_l^2), \quad (2)$$

whose first integrals are the actions $I_l = \frac{1}{2}(p_l^2 + q_l^2)$, but other cases may also be considered (see [Ste]). A classical problem is the finding of formal integrals for h on form

$$\xi_l = I_l + \sum_{n \geq 1} \varepsilon^n \xi_{l,n}, \quad l = 1, \dots, n, \quad (3)$$

where the $\xi_{l,i}(p, q)$ are homogeneous polynomials of degree $i+2$. In this paper we will see these first integrals as the result of the actions by a family of canonical formal transformations close to identity. A convenient

transformation is picked in order to bring the Hamiltonian into a much simpler form (for instance formally completely integrable). If for example, the transformed Hamiltonian $K(p, q)$ does depend only on the actions $\frac{1}{2}(p_i^2 + q_i^2)$, then they will be n first integrals for this system and by applying the inverse transform, one obtains explicitly the integrals we are looking for.

If the linear part of the Hamiltonian h has some good properties, for example the harmonic frequencies w_1, \dots, w_n are linearly independent over \mathbb{Q} , one can find such a normal form by using some Lie transform. The normal form generally does not converge, unless the system has one degree of freedom. The reader must bear in mind that we are working with formal functions, neglecting all convergence problems although in many cases truncated parts of these forms will provide useful approximations for the study of the stability of the solutions (see for example [Si, Gio, Get *al.*]).

After having given some definitions and elementary properties, we will describe the Deprit transform and the Dragt-Finn transform. In particular, we will give the relations between them and their generators. These two transformations induce methods to bring the Hamiltonian into a normal form and we will compare the complexity of the algorithms required to obtain the results.

Preliminaries

We briefly recall some definitions and properties that the reader can find in [LL, Car, Gio, Arn, MH]. We denote by L_f or $L(f)$ the Lie operator

$$L_f g = \{f, g\} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial q_i} \frac{\partial g}{\partial p_i} - \frac{\partial f}{\partial p_i} \frac{\partial g}{\partial q_i}. \quad (4)$$

T is a canonical transformation if it preserves the Poisson bracket $\{, \}$:

$$\{z_i, z_j\} = \{Tz_i, Tz_j\}, 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n.$$

We identify a canonical transformation T with a transformation on the functions on the phase space according to $Tf(z) = f(T(z))$. In terms of Lie operators we get for a canonical transformation T ,

$$TL_f T^{-1} = L_{Tf}. \quad (5)$$

From the state evolution of the hamiltonian $\dot{z}_i = \{z_i, h\}$, we deduce that for any time-independant function $f(z)$ we have

$$\dot{f} = \frac{df}{dt} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f}{\partial q_i} \dot{q}_i + \frac{\partial f}{\partial p_i} \dot{p}_i \right] = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial q_i} \frac{\partial h}{\partial p_i} - \frac{\partial f}{\partial p_i} \frac{\partial h}{\partial q_i} = \{f, h\}.$$

For a time-independant canonical transformation T , we have $\widehat{Tz} = \{Tz, T^{-1}h(Tz)\}$ so $\dot{Z}_i = \{Z_i, T^{-1}h(Z_i)\}$ for $Z_i = Tz_i$. The Hamiltonian h becomes $K = T^{-1}h$ in the new variables $Z_i = Tz_i$.

In this paper, E_i will denote the space of homogeneous polynomials of degree i in the variables (p, q) . For $f \in E_{p+2}$, L_f is a linear mapping from E_k to E_{k+p} for each k .

e^{L_f} will denote the exponential of the Lie operator L_f , that is to say, for g being a function on the phase space

$$e^{L_f} g = \sum_{n \geq 0} \frac{L_f^n}{n!} g. \quad (6)$$

Both Lie method and Dragt-Finn method are based on finding canonical transforms

$$T = I + \sum_{n \geq 1} \varepsilon^n T_n \quad \text{and} \quad T^{-1} = I + \sum_{n \geq 1} \varepsilon^n T_n^{-1}$$

that bring the Hamiltonian h into a much simpler form

$$K = T^{-1}h = K_0 + \sum_{n \geq 1} \varepsilon^n K_n.$$

This point of view has the advantage of giving the explicit change of variables and requires only the use of the inverse transform.

The Deprit transform

Given a formal series $w = \sum_{n \geq 1} \varepsilon^n w_n$, the so-called Deprit transform is the flow at time ε of the non-autonomous hamiltonian vector field given by $\frac{\partial w}{\partial \varepsilon}$. We use $\frac{\partial w}{\partial \varepsilon}$ instead of w in order to get the same transformation as the Dragt-Finn transformation generated by $g = w$ when $w = w_n$ is an homogeneous term. From (17) we deduce that

$$\frac{\partial Tz}{\partial \varepsilon} = -\left\{ \frac{\partial w}{\partial \varepsilon}(Tz), Tz \right\} = -\left\{ T \frac{\partial w}{\partial \varepsilon}(z), Tz \right\} = -TL\left(\frac{\partial w}{\partial \varepsilon}\right)z$$

so

$$\frac{\partial T}{\partial \varepsilon} = -TL\left(\frac{\partial w}{\partial \varepsilon}\right)$$

and from $TT^{-1} = I$ we have

$$\frac{\partial T^{-1}}{\partial \varepsilon} = L\left(\frac{\partial w}{\partial \varepsilon}\right)T^{-1}. \quad (7)$$

We thus deduce the formal expansion of T and T^{-1} with respect to ε

$$T_0 = I, T_n = -\sum_{p=1}^n \frac{p}{n} T_{n-p} L_{w_p}, \quad \text{and} \quad T_n^{-1} = \sum_{p=1}^n \frac{p}{n} L_{w_p} T_{n-p}^{-1}. \quad (8)$$

$f = \sum_{n \geq 0} \varepsilon^n f_n$ being a formal series in ε , we have (see [Car,LL]) that $F = T^{-1}f$ is a formal series in ε and

$$T^{-1}f = \sum_{n \geq 0} \varepsilon^n F_n \quad \text{where} \quad F_n = \sum_{0 \leq p \leq n} T_p^{-1} f_{n-p}. \quad (9)$$

One can see recursively on n that

$$T_n^{-1} = \sum_{n > m_1 > \dots > m_r} \frac{n-m_1}{n} \frac{m_1-m_2}{m_1} \dots \frac{m_r}{m_r} L_{w_{n-m_1}} \dots L_{w_{m_r}}. \quad (10)$$

The number of terms in this sum is the number of subsets of $\{1, \dots, n-1\}$, that is 2^{n-1} .

The Dragt-Finn transform

We consider a Lie generating function $g = \sum_{n \geq 1} \varepsilon^n g_n$ where $g_p \in E_p$. The Dragt-Finn transformation M_g so as its inverse M_g^{-1} are the product of single transformations

$$M_g = e^{-\varepsilon L_{g_1}} \dots e^{-\varepsilon^n L_{g_n}} \dots, \quad M_g^{-1} = \dots e^{\varepsilon^n L_{g_n}} \dots e^{\varepsilon L_{g_1}}, \quad (11)$$

where e^{L_g} is defined in (6). From

$$\frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left[e^{-\varepsilon^k L_{g_k}} \right] = -k \varepsilon^{k-1} L_{g_k} e^{-\varepsilon^k L_{g_k}} = L\left(\frac{\partial}{\partial \varepsilon} [-\varepsilon^k L_{g_k}]\right) e^{-\varepsilon^k L_{g_k}},$$

we deduce that M_g is a product of Deprit transformations. We can formally expand M and M^{-1} as

$$M = I + \sum_{n \geq 1} \varepsilon^n M_n, \quad M^{-1} = I + \sum_{n \geq 1} \varepsilon^n M_n^{-1}, \quad (12)$$

where

$$M_n^{-1} = \sum_{\rho(1, n; n)} \frac{L_{g_n}^{m_n} \dots L_{g_1}^{m_1}}{m_n! \dots m_1!}. \quad (13)$$

$\wp(p, q; n)$ denotes the set $\{m_p, \dots, m_q \in N; pm_p + \dots + qm_q = n\}$. M_n^{-1} appears to be a sum of $p(n)$ products of Lie operators where $p(n)$ is the cardinal of $\wp(1, n; n)$, that is the number of partitions of $\{1, \dots, n\}$. It is known (see [And]) that $p(n) \simeq_{\infty} \frac{e^{\sqrt{4n}}}{4n\sqrt{3}} \leq 2^{n-1}$. As above with the Deprit transform (9), for f being a formal series in ε , we get the formal expansion

$$F = M^{-1}f = \sum_{n \geq 0} \varepsilon^n F_n \quad \text{where} \quad F_n = \sum_{m=0}^n M_m^{-1} f_{n-m}. \quad (14)$$

Relationship between the transformations

Given a generating function $w = \sum_{n \geq 1} \varepsilon^n w_n$, and the corresponding Lie transform T_w , the theorem of Dragt and Finn [DF,Ste] insures that there exists a generating function $g = \sum_{n \geq 1} \varepsilon^n g_n$, such that T_w may be factored as the product

$$M_g = e^{-\varepsilon L_{g_3}} \dots e^{-\varepsilon^n L_{g_n}} \dots$$

We will see in this section the direct relation and the one-to-one correspondance between the generators. Considering a generating series g and differentiate the corresponding formal transformation M_g with respect to ε , we get

$$\begin{aligned} \frac{\partial M_g}{\partial \varepsilon} &= \sum_{n \geq 1} \left[e^{-\varepsilon L_{g_3}} \dots e^{-\varepsilon^{n-1} L_{g_{n-1}}} \right] \left[\frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left[e^{-\varepsilon^n L_{g_n}} \right] \right] \left[e^{-\varepsilon^{n+1} L_{g_{n+1}}} \dots \right] \\ &= \sum_{n \geq 1} \left[e^{-\varepsilon L_{g_3}} \dots e^{-\varepsilon^{n-1} L_{g_{n-1}}} \right] \left[-n \varepsilon^{n-1} L_{g_n} e^{-\varepsilon^n L_{g_n}} \right] \left[e^{-\varepsilon^{n+1} L_{g_{n+1}}} \dots \right] \\ &= M_g \sum_{n \geq 1} M_g^{-1} \left[e^{-\varepsilon L_{g_3}} \dots e^{-\varepsilon^{n-1} L_{g_{n-1}}} \right] \left[-n \varepsilon^{n-1} L_{g_n} \right] \left[e^{-\varepsilon^n L_{g_n}} \dots \right] \\ &= M_g \sum_{n \geq 1} \left[\dots e^{\varepsilon^n L_{g_n}} \right] \left[-n \varepsilon^{n-1} L_{g_n} \right] \left[e^{-\varepsilon^n L_{g_n}} \dots \right] \\ &= M_g L \left[\sum_{n \geq 1} -n \varepsilon^{n-1} \left[\dots e^{\varepsilon^n L_{g_n}} \right] g_n \right]. \end{aligned}$$

Thus we have

$$\frac{\partial M_g}{\partial \varepsilon} = -M_g L(S),$$

in which

$$\begin{aligned} S &= \sum_{n \geq 1} n \varepsilon^{n-1} \left[\dots e^{\varepsilon^{n-1} L_{g_{n-1}}} \right] g_n \\ &= \sum_{n \geq 1} \varepsilon^{n-1} \left[\sum_{k=1}^n k \sum_{\wp(k+1, n-k; n-k)} \frac{L_{g_{n-k}}^{m_{n-k}} \dots L_{g_{k+1}}^{m_{k+1}}}{m_{k+1}! \dots m_{n-k}!} g_k \right]. \end{aligned}$$

where \wp is defined in (13). On the other hand we have (8)

$$\frac{\partial T_w}{\partial \varepsilon} = -T_w L\left(\frac{\partial w}{\partial \varepsilon}\right),$$

so from the initial conditions $T_0 = M_0 = I$, a necessary and sufficient condition to have $T_w = M_g$ is

$$S = \frac{\partial w}{\partial \varepsilon},$$

that is, when we consider each term of the formal development

$$w_n = \sum_{1 \leq k \leq n} \frac{k}{n} \sum_{p(k+1, n-k; n-k)} \frac{L_{g_{n-k}}^{m_{n-k}} \cdots L_{g_{k+1}}^{m_{k+1}}}{m_{k+1}! \cdots m_{n-k}!} g_k. \tag{15}$$

These formula give directly w_n as a linear combination of Poisson brackets of the g_i 's. Because the connection between the w_i 's and the g_i 's has a triangular form, we deduce the same property for the g_i 's, that is, each g_i may be written as a linear combination of Poisson brackets of the w_j 's.

Computing of the inverse transform

In the light of the precedings sections, the main step is the computing of the inverse transform. For the Deprit transform, we will use the algorithm proposed by Henrard [Hen], that is issued from the relations between the T_p^{-1} and is often used for example by Giorgilli [Gio] for several evaluations. For the Dragt-Finn transform, as we do not know any closed formula between the M_p^{-1} , we will use the fact that the transformation is the product of single homogeneous transformations.

Given $f = \sum_{n \geq 0} \varepsilon^n f_n$ a formal series in ε , we call F the inverse transformed function $T^{-1}f = \sum_{n \geq 0} \varepsilon^n F_n$. These algorithms may also be used for the computing of the transformation as we will see.

The Deprit inverse transform

From $F_n = \sum_{k=0}^p T_p^{-1} f_{n-p}$ and the relation $T_p^{-1} f_q = \sum_{k=1}^p L_{w_k} T_{p-k}^{-1} f_q$, we will construct successively $F_{p,q} = T_p^{-1} f_q$ for $p+q \leq r$. We have to fill a two dimensional array

f_0	f_1	f_2	\cdots	f_i	\cdots	\cdots	f_n
	$F_{1,0}$	$F_{1,1}$	$F_{1,2}$		\ddots	\vdots	$F_{1,n-1}$
		\ddots	\ddots		\ddots	\ddots	\vdots
			\ddots	$F_{i,0}$	$F_{i,1}$	\cdots	$F_{i,n-i}$
					\ddots	\ddots	\vdots
\downarrow	\downarrow	\downarrow	\cdots	\downarrow	\cdots	\cdots	$F_{n,0}$
F_0	F_1	F_2	\cdots	F_i	\cdots	\cdots	F_n

column by column. Each term $F(j, i-j)$ is deduced from the precedings $F(k, i-j)$ in the same diagonal which is independant from the others. In particular if $f_i = F(i, 0)$ we get $F(k, i) = 0$ for each k . Each term F_i is obtained as the sum of the terms of the column $F(j, i-j)$. From the initial values $F_0 = f_0, \dots, F_r = f_r$, we will use a loop like:

```

for i := 1 to r do
  for j := 1 to i do
    begin
      for k := 1 to j do  $F_{j,i-j} := F_{j,i-j} + \frac{k}{j} \{w_k, F_{j-k,i-j}\}$ 
       $F_i := F_i + F_{j,i-j}$ 
    end
  end

```

(16)

We have to evaluate a Poisson bracket of a term of order ε^p against a term of order ε^q when $k = p$ and $j - k + i - j = q$ or equivalently when $k = p$ and $i = p + q$ in the preceding algorithm. The number of such Poisson brackets is the cardinal of $\{j; p \leq j \leq p + q\}$, that is $q + 1$.

The number of Poisson brackets required is a good indication but we have also to pay attention to the number of terms kept in stack. In the algorithm proposed for the Deprit method, it is necessary to keep in stack all the $F_{p,q}$ for $p + q \leq r$ in order to calculate F_0, \dots, F_r . Furthermore it may be interesting to keep them in order to calculate F_{r+1} if necessary. We would rather say that the Deprit transform uses the

evaluation of $q + 1$ Poisson brackets involving polynomials of order p and q and to keep in stack $k + 1$ terms of order k .

The Dragt-Finn inverse transform

As we do not know any closed formula for M_n^{-1} , the computation of $\sum_{m=0}^n M_{n-m}^{-1} f_m$ would require $\sum_{i \leq n} p(i)$ steps which is quite less than 2^n . The fact that M^{-1} is the product of single transformations allow us to use the following algorithm. Given a function $f = \sum_{n \geq 0} \varepsilon^n f_n$, we consider the auxiliary series of functions, $F^0 = f$, $F^k = e^{\varepsilon^k L_{g_k}} F^{k-1}$. We have

$$F_n^k = \sum_{j+k=p=n} \frac{1}{j!} L_{g_k}^j F_p^{k-1} \tag{17}$$

so $F_n = F_n^n$. Given $F_{|r}^{k-1} = \sum_{p=0}^r \varepsilon^p F_p^{k-1}$, we construct successively $F_{|r}^{k,0} = F_{|r}^{k-1}$, $F_{|r}^{k,i} = \frac{1}{i} L_{g_k} F_{|r}^{k,i-1}$ while $i \leq \lfloor \frac{r}{k} \rfloor = \max\{n \in N; n \leq \frac{r}{k}\}$. We obtain $F_{|r}^k$ as $\sum_{k i \leq r} F_{|r}^{k,i}$. We will use the following construction

$$\begin{array}{cccccccc} f_0 & f_1 & f_2 & \cdots & f_i & \cdots & \cdots & f_r \\ & F_1^1 & F_2^1 & F_3^1 & & \ddots & \vdots & F_r^1 \\ & & & \ddots & \ddots & & \ddots & \\ & & & & \ddots & \ddots & & \vdots \\ & & & & & F_i^i & F_{i+1}^i & \cdots & F_r^i \\ & & & & & & \ddots & & \vdots \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & \cdots & \downarrow & \cdots & \cdots & F_r^r \\ F_0 & F_1 & F_2 & \cdots & F_i & \cdots & & F_r \end{array}$$

from the following algorithm

```

for i := 1 to r do
  begin
    for k := i to r do
      for j := 1 to floor(r/i) do  $F_{i+j-1,k} := \frac{1}{j} \{g_i, F_{i+j-2,k-i}\}$ 
    for k := i to r do
      begin
        for j := 2 to floor(r/i) do  $F_{i,k} := F_{i,k} + F_{i+j-1,k}$ 
           $F_{i,k} = F_{i,k} + F_{i-1,k}$ 
        end
      end
    end
  end
end
\tag{18}

```

The array is filled line by line, and that is the main difference with the preceding algorithm. We stack temporarily the $F_k^{i,j}$ in the same array in the $(i + j - 1)$ th line. A Poisson bracket involving a term of order ε^p and a term of order ε^q is obtained when $i = p$ and $k - i = q$, so the number of such Poisson brackets is $\lfloor \frac{p+q}{p} \rfloor$.

On the other hand, this algorithm uses an array which is partially erased after each loop. This array is filled with the terms $F_p^{i,j}$ for $ij \leq p \leq r$. During the computing of the F^i , the array is filled first by the $F^{i'}$ for $0 \leq i' \leq i$ that gives $\inf(i, k + 1)$ terms of an given order k and by the $F^{i,j}$ that gives also $\lfloor \frac{k}{i} \rfloor$ terms of order k . We thus have simultaneously $\inf(i, k + 1) + \lfloor \frac{k}{i} \rfloor$ terms of order k in the array. If $i \geq k$, we get $\inf(i, k + 1) + \lfloor \frac{k}{i} \rfloor = k + 1$, otherwise $\inf(i, k + 1) + \lfloor \frac{k}{i} \rfloor = i + \lfloor \frac{k}{i} \rfloor \leq i + \frac{k}{i} \leq k + 1$ so the array contains at most $k + 1$ terms of order k .

Numbers of Poisson brackets evaluations

From $\left[\frac{p+q}{p}\right] \leq \frac{p+q}{p} = q+1$, we deduce that for given orders p and q , the computing of the Dragt transform uses less Poisson brackets involving polynomials of order p and q than the Deprit transform. Furthermore the total number of Poisson brackets required to compute F_0, \dots, F_r with the Lie transform is

$$t'_r = \sum_{1 \leq p+q \leq r} q + 1 = \sum_{i=1}^r \sum_{q=0}^{i-1} q + 1 = \sum_{i=1}^r \frac{i(i-1)}{2} = \frac{r(r+1)(r)}{6} = \frac{r^3}{6} + O(r^2). \quad (19)$$

For the Dragt transform it is

$$m'_r = \sum_{1 \leq p+q \leq r} \left[\frac{p+q}{p}\right] = \sum_{i=1}^r \sum_{p=1}^i \left(\frac{i}{p} + O(1)\right) = \sum_{i=1}^r (i \log i + O(i)) = \frac{1}{2} r^2 \log r + O(r^2). \quad (20)$$

For given orders r of the perturbation, we give the the number of products of Lie operators involved in $\sum_{k \leq r} T_k^{-1}$ (resp. $\sum_{k \leq r} M_k^{-1}$) and the number of Poisson brackets evaluated during the computing by the preceding algorithms of $F|_r = T^{-1}f$ (resp. M^{-1}).

Order	Number of terms in M_n^{-1}	Number of terms in T_n^{-1}	Number of terms in $M^{-1}f$	Number of terms in $M^{-1}f$
0	0	0	0	0
1	1	1	1	1
2	3	3	4	4
3	6	7	9	10
4	11	15	17	20
5	18	31	27	35
6	29	63	41	56
7	44	127	57	84
8	66	255	77	120
9	96	511	100	165
10	138	1023	127	220
15	683	32767	314	680
20	2713	1048575	600	1540
30	28628	1073741823	1492	4960

The Dragt-Finn transform requires clearly less Poisson brackets evaluations than the Deprit transform. On the other hand, the Deprit transform and the Dragt transform both require to keep in stack $k + 1$ terms of order k (that can be polynomials of degree k or $k + 2$) that are necessary either to succeed the computing at the order or to reduce the cost for the computation of next orders in the future.

Conclusion

As the Deprit method and the Dragt-Finn methods produce the same new Hamiltonians when the frequencies of h_0 have no linear dependancies over Q , it seems that the Dragt-Finn one is more efficient, regards to the number of steps required for the computation. Nevertheless, the Deprit method can be more easily adapted for non-autonomous hamiltonian systems (see [Car]) and is may be more practical to implement, while it does not need any use of auxiliary functions that are erased after each loop. This aspect could explain the apparent better behavior of the Deprit transform in [FE], especially when the order of the perturbation is low.

Acknowledgments

I am grateful to J. Laskar for many helpful comments.

Bibliography

- [Arn] V. I. Arnold, *Mathematical Methods on Classical Mechanics* 1978, Springer Verlag
- [BGG] Benettin, Galgani, Giorgilli, *A Proof of Nekhoroshev's Theorem for the Stability Times in Nearly Integrable Hamiltonian Systems*, 1988, pp=423-439, *Annales de l'Institut Henri Poincaré* Vol. 48
- [Car] J.R. Cary, *Lie Transform Perturbation Theory for Hamiltonian Systems* in *Physics Reports* 79-2, 1981, pp=129-159, North-Holland Publishing Compagny
- [Dep] A. Deprit, *Canonical transformations depending on a small parameter*, 1969, pp=12-30, *Celestial Mechanics* 1
- [DF] J. Dragt, J. M. Finn, *Lie Series and invariant functions for analytic symplectic maps*, 1976, pp=2215-2227, *Journal of Mathematical Physic*, 17
- [FE] E. Fried, G. Ezra, *PERTURB: A Special-Purpose Algebraic Manipulation Program for Classical Perturbation Theory*, 1987, pp=397-411, *Journal of Computational Chemistry*
- [Gio] A. Giorgilli, *Rigorous results on the power expansions for the integrals of a Hamiltonian system near an elliptic equilibrium point*, in *Annales de l'Institut Henri Poincaré* Vol. 48, 1988, pp=423-439, Gauthier-Villars
- [GG] A. Giorgilli, L. Galgani, *Formal integrals for an autonomous hamiltonian system near an equilibrium point*, 1977, pp=267-280, *Celestial Mechanics* 17 94,
- [Get al.] Giorgilli, Delshams, Fontich, Galgani, Simo, *Effective Stability for a Hamiltonian System near an Elliptic Equilibrium, with an Application to the restricted Three Body Problem*, 1988, *Journal of Diff. Equations*
- [Hen] J. Henrard, *The Algorithm of the Inverse for Lie transform*, 1973, pp=250-259, *Recent Advances in Dynamical Astronomy*, D. Reidel Publishing Compagny
- [LL] Lieberman, Lichtenberg, *Regular and Stochastic Motion*, 1988, Springer Verlag
- [LM] P. Lochak, C. Meunier, *Multiphase Averaging for Classical Systems*, 1988, New-York, Applied Mathematical Sciences 78, Springer Verlag
- [MH] K. R. Meyer, G. R. Hall, *Introduction to Hamiltonian Dynamical Systems and the N-Body Problem*, 1992, New-York, Applied Mathematical Sciences 92, Springer Verlag
- [Ste] S. Steinberg, *Lie Series, Lie Transformations, and their applications in Lie Methods in Optics*, 1985, Leon, Mexico, *Lecture Notes in Physics* 250, Springer Verlag

Problèmes numériques dans les intégrations à long terme du système solaire.

Frédéric Joutel

Méthodes d'intégration numérique.

L'étude des intégrateurs multipas (méthodes d'Adams, mais aussi méthodes linéaires plus générales) est un préalable à l'obtention de résultats très précis sur quelques millions d'années.

J'ai étudié plus particulièrement les méthodes de réduction des erreurs d'arrondi effectuées lors des multiplications et des additions en double précision. On peut les réduire par différents moyens:

- passage en quadruple précision pour les passages concernés.
- méthode de calcul approché des erreurs commises.

J'ai pu observer l'extrême sensibilité de ces intégrateurs aux erreurs de calcul, sans qu'il me soit possible de discerner, autrement que par la pratique, les méthodes les plus précises. Par exemple, si l'influence globale des erreurs sur les coefficients rationnels de ces méthodes est connue, une différence à priori minime des représentations de ces coefficients en machine (fractions irréductibles ou fractions réduites à un même dénominateur) entraîne des erreurs importantes sur les longitudes sur un million d'années, le deuxième type de représentation entraînant assez paradoxalement des erreurs plus faibles sur les essais effectués.

Polynômes d'interpolation d'Hilbert.

Les polynômes d'interpolation d'Hilbert (approximation d'une fonction ainsi que ses dérivées par un polynôme) permet d'étendre et d'améliorer la méthode d'interpolation de Lagrange. De façon significative, ces polynômes interpolent, à degré donné, une fonction ainsi que ses dérivées mieux que les polynômes de Lagrange.

Cette méthode est utile lorsqu'on désire une bonne approximation polynomiale uniforme d'une solution d'une équation différentielle, et ceci à un coût comparable à une méthode d'interpolation de Lagrange.

References

- Milani A., Nobili A.M.: 1988, 'Integration error over very long time spans', *Celes. Mech.* **43**, 1-34
Quinn T.R., Tremaine S., Duncan M.: 1991, 'A three million year integration of the Earth's orbit', *Astron. J.* **101**, 2287-2305
Stoer J., Burlish R.: 1980, Introduction to Numerical Analysis, *Springer-Verlag*

ETUDE DE TRAJECTOIRES SELENOCENTRIQUES

Daniel Steichen

1 Introduction

Cette étude concerne l'orbitographie de satellites artificiels autour de la Lune dans le but de missions. On se propose d'étudier toutes les trajectoires de satellites lunaires situées à une distance inférieure à 10000 km en ne considérant pour le moment que les actions dérivant d'un potentiel.

La fonction perturbatrice dépend :

- de l'attraction solaire,
- de l'attraction terrestre,
- du potentiel lunaire décrit en harmoniques sphériques,
- de la libration de l'équateur lunaire sur l'écliptique.

Comme l'on ne connaît pas à priori la classe d'orbites choisie, les équations introduites doivent rester les plus générales possibles et permettre de trouver la solution en fonction de n'importe quelle condition initiale. L'intégration numérique directe semblerait être la méthode la plus appropriée, mais elle a deux défauts:

- les courtes périodes du satellite (périodes de révolution de celui-ci autour de la Lune) nécessitent un pas d'intégration de l'ordre de la demi heure; ce qui se traduit par une propagation de l'erreur importante pour de longues durées et un temps de calcul prohibitif,
- la complexité des équations empêche toute classification des orbites en fonction des conditions initiales.

C'est pour cette raison que nous avons choisi une méthode de "moyennisation", en l'occurrence de Von Zeipel. Elle permet l'élimination des angles à variations rapides et d'obtenir les évolutions séculaires et à longues périodes des orbites. Un changement de variables donne néanmoins la longitude du satellite.

L'originalité du travail est qu'il permet de considérer des orbites de satellite pour toute valeur de l'excentricité ou de l'inclinaison à un demi grand axe initial donné. Pour cela il a été nécessaire d'utiliser les variables de Poincaré qui sont non singulières pour une orbite circulaire ou dans le plan de référence et de pas développer les expressions en fonction de l'excentricité et de l'inclinaison.

Le manipulateur algébrique de Jacques Laskar (1989) appliqué à la mécanique céleste a été utilisé pour obtenir les seconds membres avec une précision suffisante.

Dans une première partie du travail, le développement de la fonction est effectué en fonction des petits paramètres utilisés. En particulier, on introduit une théorie semi-analytique du mouvement de la Lune autour de la Terre (Chapront et Chapront-Touzé 1982) et de la libration du plan de l'équateur lunaire par rapport à l'écliptique (Eckhardt 1981).

Une deuxième partie montre le choix de variables canoniques (variables de Poincaré) qui va permettre d'obtenir des équations sans singularité. On montrera aussi l'élimination de la longitude moyenne du satellite et l'introduction d'une fonction génératrice par la méthode de Von Zeipel Poincaré. L'élimination des angles à moyenne période se fera ensuite pour obtenir un système deux fois moyenné dont les périodes sont a priori supérieures à 28 jours.

Un prolongement de ce travail permettra de classer les orbites de façon "théorique" par une analyse des équations deux fois moyennées.

2 Aspects théoriques

2.1 Fonction perturbatrice

a)

Le plan de l'écliptique est choisi comme système de référence pour les raisons suivantes:

- il est supposé fixe (durée des missions très courtes),
- l'orbite de la Lune autour de la Terre est donnée de façon précise dans ce repère,
- le mouvement du plan de l'équateur lunaire par rapport à ce plan est calculé avec une bonne précision,
- les positions du plan de l'équateur lunaire et de l'orbite de la Lune sont définies par des inclinaisons très petites.

b)

Les coordonnées de Jacobi sont classiquement utilisées pour mettre un problème sous forme canonique et bien adaptées au satellite lunaire. Le principe consiste à repérer chaque corps par rapport au barycentre des précédents:

- le mouvement de la Lune (corps 1) est repéré par rapport à celui du satellite (corps 0); vecteur \vec{r}_0 ,
- le mouvement de la Terre (corps 2) est repéré par rapport au barycentre Lune-satellite ; vecteur \vec{r}_2 ,
- le mouvement du soleil (corps 3) est repéré par rapport au barycentre Terre-Lune-satellite ; vecteur \vec{r}_3 .

La fonction de force décrivant le mouvement à l'aide de ces coordonnées est:

$$F = G \left[\frac{m_1}{r_0} - \frac{m_2}{r_2^3} \vec{r}_0 \cdot \vec{r}_2 + \frac{m_2}{r_{02}} + \frac{m_3}{r_{03}} - \frac{m_3}{r_{13}^3} \left(\frac{m_2}{m_1 + m_2} \vec{r}_0 \cdot \vec{r}_2 + \vec{r}_0 \cdot \vec{r}_3 \right) \right]$$

Les coordonnées de la Terre sont données par la longitude vraie, latitude et rayon vecteur. On a utilisé une théorie semi-analytique du mouvement de la Lune qui donne une solution sous la forme de développements en série de Fourier dont les arguments, fonctions linéaires du temps, sont des combinaisons linéaires des arguments fondamentaux de la Lune (Chapront chapront-Touzé 1982).

La formulation est la suivante:

$$w_2 = \lambda_2 + \sum_i A_i \sin L_i$$

$$u_2 = \sum_i B_i \cos L_i$$

$$r_2 = a_{te} \sum_i C_i \cos L_i$$

λ_2 est la longitude moyenne de la Lune, a_{ie} , A_i , B_i et C_i sont des constantes numériques et $L_i = i_1 D + i_2 F + i_3 l + i_4 l'$ où D , F , l et l' sont les arguments de Delaunay.

A la précision nécessaire, un mouvement simplifié du Soleil autour de la Lune est suffisant. Les éléments métriques sont supposés constants et les éléments angulaires linéaires du temps.

c)

La fonction perturbatrice lunaire explicitée en coordonnées cartésiennes dans le repère lié à l'équateur lunaire s'exprime par:

$$\begin{aligned}
 R' = & -\frac{Gm_1}{r} \left(\frac{R_1}{r}\right)^2 \left[C_{20} \left(\frac{3}{2} \frac{z'^2}{r^2} - \frac{1}{2} \right) + C_{22} \left(3 \frac{x'^2}{r^2} - 3 \frac{y'^2}{r^2} \right) \right] \\
 & -\frac{Gm_1}{r} \left(\frac{R_1}{r}\right)^3 \left[C_{30} \left(\frac{5}{2} \frac{z'^2}{r^2} - \frac{3}{2} \frac{z'}{r} \right) + C_{31} \frac{x'}{r} \left(\frac{15}{2} \frac{z'^2}{r^2} - \frac{3}{2} \right) \right. \\
 & \quad + S_{31} \frac{y'}{r} \left(\frac{15}{2} \frac{z'^2}{r^2} - \frac{3}{2} \right) + C_{32} 15 \frac{z'}{r} \left(\frac{x'^2}{r^2} - \frac{y'^2}{r^2} \right) \\
 & \quad + S_{32} 15 \frac{z'}{r} \left(2 \frac{x'y'}{r^2} \right) + C_{33} 15 \frac{x'}{r} \left(\frac{x'^2}{r^2} - 3 \frac{y'^2}{r^2} \right) \\
 & \quad \left. + S_{33} 15 \frac{y'}{r} \left(3 \frac{x'^2}{r^2} - \frac{y'^2}{r^2} \right) \right]
 \end{aligned}$$

où R_1 est le rayon équatorial lunaire et les C_{ij} et S_{ij} sont les premiers harmoniques du potentiel lunaire.

Il est nécessaire d'exprimer (x', y', z') coordonnées du satellite dans le repère lié à l'équateur lunaire en fonction de (x, y, z) coordonnées du satellite dans le repère lié à l'écliptique passant par la Lune. Pour cela, il faut introduire la libration de l'équateur lunaire par rapport à l'écliptique. La théorie choisie est celle de Eckhardt(1981).

Eckhardt utilise les paramètres classiques:

- ρ la libration en inclinaison,
- σ la libration du nœud,
- τ la libration en longitude.

Le changement de repère se définit par la composée de trois rotations autour des axes adéquats. Et on a ;

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = R(\rho, \sigma, \tau) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

d)

Afin d'appliquer la méthode de Von Zeipel-Poincaré, nous avons besoin de classer les termes des fonctions perturbatrices en différents ordres.

L'ordre 0 est associé au mouvement principal, il correspond à n_{sat} le moyen mouvement du satellite.

L'ordre 1 est associé au mouvement de la Lune autour de la Terre et correspond à n_2 le moyen mouvement de la Lune.

		orbite basse 3000km	orbite haute 10000 km
ordre 0	n_{sat}	10^0	10^0
ordre 1	début n_2 fin	$10^{-2.2}$ $10^{-3.1}$	$10^{-1.4}$ $10^{-1.8}$
ordre 2	début fin	$10^{-3.2}$ $C_{20};C_{22};C_{31};Terre$ $10^{-4.6}$	$10^{-1.9}$ $Terre$ $10^{-3.5}$
ordre 3	début fin	$10^{-4.7}$ $C_{20};C_{22};Terre$ $C_{30};C_{31};C_{32};C_{33}$ $S_{31};S_{32};S_{33}$ $10^{-6.4}$	$10^{-3.6}$ $C_{20};Terre$ $10^{-4.9}$
ordre 4	début fin	$10^{-6.5}$ $C_{20};C_{22};Terre,Soleil$ $C_{30};C_{31};C_{32};C_{33}$ $S_{31};S_{32};S_{33}$ $10^{-7.9}$	$10^{-5.0}$ $Terre,Soleil$ $C_{20};C_{22};C_{31}$ $10^{-6.0}$

Tableau : Classement des termes de la fonction perturbatrice.

2.2 Méthode de résolution

a)

Par la méthode de Von Zeipel une grande partie du problème est résolue de façon analytique. Des transformations proches de l'identité permettent d'éliminer les angles à variations rapides et d'obtenir un système moyenné plus simple à résoudre numériquement.

L'hamiltonien décrivant le mouvement du satellite a une expression de la forme :

$$F = F_0 + R(\vec{r}, t)$$

F_0 est la partie principale correspondant au mouvement non perturbé

$R(\vec{r}, t)$ est la fonction perturbatrice

Afin d'obtenir une formulation hamiltonienne, il est nécessaire d'introduire une nouvelle variable φ_4 associée au temps; I_4 est la variable canonique conjuguée. Les autres variables canoniques que l'on va utiliser sont celles de Poincaré qui permettent d'obtenir des équations régulières pour toute excentricité et inclinaison.

Si on définit l'hamiltonien par :

$$H = \frac{G^2 m_1^2}{2I_1^2} - I_4 + R(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, I_1, I_2, I_3, -)$$

Les équations différentielles régissant le système sont:

$$(1) \quad \begin{pmatrix} \frac{d\varphi}{dt} \\ \frac{dI}{dt} \end{pmatrix} = J \begin{pmatrix} \frac{\partial H}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial H}{\partial I} \end{pmatrix}$$

J est la matrice symplectique (8 8)

b)

La longitude moyenne φ_1 du satellite dans son mouvement autour de la Lune est éliminée au moyen de la fonction génératrice S définie par :

$$S(\varphi, I') = \sum_{i=1}^{i=4} I' \varphi + \epsilon S_1 + \epsilon^2 S_2 + \epsilon^3 S_3$$

$$I = \frac{\partial S(\varphi, I')}{\partial \varphi}$$

$$\varphi' = \frac{\partial S(\varphi, I')}{\partial I'}$$

Les équations régissant le mouvement auront la forme (1) avec $\frac{dI_1'}{dt} = 0$

c)

On élimine les angles dont la fréquence est proche de celle de la Lune dans son mouvement autour de la Terre. Le système devient plus simple puisque les seconds membres ne contiennent que des fonctions dont les fréquences sont supérieures à 28 jours. Le pas d'intégration que l'on peut choisir désormais est de l'ordre de quelques jours.

d)

Les équations moyennées une seule fois contiennent 1000 termes dans leurs seconds membres. La moyennisation n'a été que jusqu'à l'ordre 3. Elles sont résolues en moins d'un quart d'heure avec une précision suffisante. Les équations moyennées deux fois jusqu'à l'ordre 3 contiennent 500 termes. Elles permettent de résoudre le système sur une période de 5 ans en moins d'une demi heure sur un SUN. Les équations moyennées deux fois jusqu'à l'ordre 4 contiennent 6000 termes. Elles permettent de résoudre le système sur une période de 10 ans en moins d'une heure avec une précision plus grande.

3 Conclusion

Les développements réalisés dans cette étude offrent un cadre théorique et les outils informatiques permettant d'intégrer l'évolution de trajectoires lunaires sur de longues durées (10 ans et plus) avec un temps de calcul raisonnable (inférieur à l'heure sur un SUN).

Les effets pris en compte (Lune, Terre, Soleil) et l'ordre atteint permettent d'escompter une très bonne précision, qu'il reste cependant à estimer par comparaison avec des trajectoires intégrées numériquement sur des périodes raisonnables (compromis entre le pas d'intégration et les erreurs de troncature et d'arrondi).

La méthode utilisée permet d'offrir un champ d'application très général, applicable à tout système décrivant le mouvement de 1 corps de masse négligeable (astéroïdes, satellites artificielles)

La suite de cette étude concerne la classification systématique des trajectoires lunaires. L'action de la pression de radiation solaire devra être introduite pour les orbites lointaines.

4 Bibliographies

Chapront, J. et Chapront-Touzé, M. : 1982, "Tables simplifiées du mouvement de la Lune issues de ELP-2000", Notes scientifiques et techniques du bureau des longitudes.

Eckhart, Donald H. : "Theory of the libration of the Moon", The Moon and the planets.

Laskar, J. : 1989, "Manipulations des séries", Les méthodes modernes de la mécanique céleste, Goutelas 1989, Editions Frontières.

Ce travail a été fait dans le cadre d'un contrat CNES sous la direction de madame Irène Stellmacher.

Les symétries du Problème des n corps. L'origine des comètes à courte période.

C.Edelman.

Durant la période 1990 - 1992 mon travail a concerné les symétries du problème des n corps, et la capture des comètes paraboliques ou à très longue période par le système solaire lors d'une rencontre très proche avec une planète.

1) Les symétries du problème des n corps.

a) Position du problème. Les symétries du Problème des deux corps.

Une symétrie d'un système évolutif correspond à une invariance des équations du mouvement par certaines opérations. Les symétries considérées ici sont des changements de variables de l'espace-temps n'affectant pas les équations du mouvement. L'espace est à trois dimensions. Le problème des n corps possède de tels groupes d'invariance mais aucune de ces transformations ne font varier la quantité C^2H produit du carré du moment cinétique dans le mouvement autour du centre de gravité du système par la constante de l'énergie de ce mouvement. Dans le cas de deux corps aucune ne font donc varier l'excentricité ; or ce problème possède l'intégrale vectorielle de Laplace, il existe donc, d'après le théorème de Noether, des symétries associées.

J'ai défini deux familles de symétries transformant une solution du problème newtonien des deux corps en une autre solution d'excentricité différente de ce problème. L'une comporte une inversion et peut échanger deux solutions non bornée et bornée *de paramètre non nul*, l'autre, comporte une affinité orthogonale ; elle peut transformer, *au sein d'un même groupe, elliptique, parabolique, hyperbolique*, une solution de collision en une solution de paramètre non nul.

Ainsi, deux solutions arbitraires du Problème des deux corps se correspondent en composant les diverses symétries. En particulier une solution quelconque peut se transformer en une solution circulaire par un changement de variables de l'espace et du temps.

Est-il possible de généraliser les symétries faisant varier l'excentricité pour $n = 2$ en des symétries modifiant la quantité C^2H pour n quelconque ? Pour cela on peut étudier les arbitraires du référentiel.

b) Symétries et arbitraires du référentiel. Généralisation à n corps.

Pour décrire l'évolution d'un système physique il faut définir un système de référence dont les arbitraires traduisent la relativité, c-à-d. la non observabilité de certaines entités absolues, telles que, par exemple, l'orientation des axes, leur origine, l'origine des temps, etc.. A une propriété de relativité correspond une symétrie du système. Cela signifie que certains changements du référentiel, tels que, par exemple, les rotations, les translations, etc., n'affectant pas le mouvement, engendrent des symétries.

Les deux familles de symétries changeant l'excentricité pour $n = 2$ s'étendent à n corps si la propriété associée de relativité du référentiel est indépendante du nombre de

corps ; dans une première étape j'ai effectué la généralisation aux solutions centrales du problème des n corps.

Publications.

1990: C.Edelman, *Rectifications régularisantes du Problème des deux corps.*
Celest.Mechanics 47, 15.

1990: C.Edelman, *Discussion sur le Problème des deux corps.*
Journées 1990 systèmes de référence spatio-temporels. Paris.

2) Capture des comètes. Hypothèse de leur fragmentation.

J'ai étudié, par une approche indépendante de celle de ma thèse, le *scenario idéal* de capture héliocentrique d'une comète parabolique ou à très longue période, lors d'un passage proche avec une planète. Pour cela, j'ai considéré le cadre limite du choc d'une particule et d'une planète tel que l'a défini Poincaré pour deux planètes dans le cadre des solutions périodiques de deuxième espèce. La comète est soumise à une accélération infiniment grande pendant un temps infiniment court. Sa vitesse héliocentrique subit alors une discontinuité.

J'ai l'intuition que, au moins à l'ordre zéro par rapport à la masse de la planète, le *scenario idéal*, dans le cas de la capture d'une comète (quasi)- parabolique, est une conséquence du principe de Moindre Action. Ce principe gouverne les équations du mouvement héliocentrique de la comète. Le scénario optimal réalise le minimum de l'énergie cinétique pour une variation donnée de la période de la comète. Ce modèle de capture est décrit par une impulsion appliquée parallèlement au vecteur vitesse héliocentrique en sens inverse du mouvement au périhélie de l'orbite initialement non périodique devenant l'aphélie de la comète capturée. Si cette impulsion était donnée artificiellement elle serait la plus économique en carburant parmi toutes les impulsions possibles. J'ai testé les conséquences d'un tel choc sur les éléments observés des comètes du groupe de Jupiter, ceux de certains astéroïdes et de certaines météorites. Les tests numériques suggèrent la fragmentation d'un nombre restreint de comètes (quasi)-paraboliques géantes en plusieurs comètes plus petites à courte période lors du choc, selon l'hypothèse formulée par Bredekhnin en 1889. C.f. Edelman (1991).

J'ai étudié l'origine par capture éventuelle de plusieurs familles de comètes de période supérieure à 20 ans et inférieure à 446 ans, dans le même contexte.

Publications.

1991: C.Edelman, *Capture of comets and the break-hypothesis.*
Astron.Astrophys. 244, 228.

QUELQUES TRAVAUX HISTORIQUES

Bruno Morando

Laplace

J'ai terminé à la fin de l'année 1991 le chapitre sur Laplace que je devais faire pour la *General History of Astronomy* publiée par l'Union Astronomique Internationale. Ce chapitre s'ajoute au deux chapitres que j'avais déjà rédigés, l'un sur l'âge d'or de la mécanique céleste et l'autre sur trois cents ans d'éphémérides et de tables astronomiques.

Les rédacteurs du volume ont été d'accord pour que Jacques Laskar rédige un chapitre, non prévu dans le projet initial, sur l'évolution des idées concernant la stabilité du système solaire.

D'Alembert

Il est prévu de rééditer les œuvres complètes de d'Alembert. François de Gandt est responsable de fait de ce projet qui est patronné par plusieurs unités de recherche du CNRS. On m'a demandé de m'occuper de la partie de l'œuvre de d'Alembert qui concerne la mécanique céleste et j'ai réuni une petite équipe composée, outre de moi-même, de Michèle Chapront, Jacques Laskar et François Mignard.

Une *Journée d'Alembert*, organisée par le Bureau des Longitudes, se tiendra le 26 mars 1992 à l'observatoire. Les membres de l'équipe dont on vient de parler présenteront leurs premiers travaux de recherche sur l'œuvre de d'Alembert dans le domaine de la mécanique céleste.

ACTIVITES DE SERVICE

LA CONNAISSANCE DES TEMPS,
EPHEMERIDE MERE DU BUREAU DES LONGITUDES

Jean Chapront

Les publications annuelles du Bureau des Longitudes

Le Bureau des Longitudes publie 5 éphémérides annuelles:

DEUX EPHEMERIDES "PROFESSIONNELLES" DE GRANDE PRECISION

La Connaissance des Temps : le Soleil - la Lune - les planètes - les satellites galiléens de Jupiter - et des données diverses sur les éphémérides et l'astronomie de position.

Les Suppléments à la Connaissance des Temps: ils concernent les éphémérides des satellites, et sont publiés sous les titres suivants:

- *Ephémérides des satellites naturels des planètes* : les satellites de Mars - les satellites galiléens de Jupiter - les huit premiers satellites de Saturne - les satellites d'Uranus - des données physiques diverses sur les satellites;
- *Phénomènes et configurations des satellites galiléens de Jupiter*;
- *Configurations des satellites de Saturne*;
- *Les éphémérides des satellites faibles de Jupiter et Saturne*.

En outre, l'Etablissement diffuse sous le titre des Notes Scientifiques et Techniques du Bureau des Longitudes des suppléments annuels:

Les éphémérides de petites planètes et de comètes.

UNE EPHEMERIDE "GENERALISTE" DE PRECISION MOYENNE

Annuaire du Bureau des Longitudes - Ephémérides astronomiques: le Soleil - la Lune - les planètes et leurs satellites - les astéroïdes et les comètes - les éphémérides pour les observations physiques du Soleil et des planètes - des données diverses sur les étoiles, les positions et les occultations - les éclipses - la liste des phénomènes astronomiques de l'année - et des données diverses sur les calendriers.

DEUX EPHEMERIDES SPECIALISEES

Les éphémérides nautiques;

Les éphémérides aéronautiques.

L'évolution de la Connaissance des Temps depuis 1979

LA FORME

Jusqu'en 1979 la Connaissance des Temps est parue sous le titre: *La Connaissance des Temps - Ephémérides astronomiques pour l'an xxxx*. C'était une éphéméride tabulée qui prenait la forme d'un gros volume de 680 pages. Elle contenait les informations suivantes: les éphémérides des principaux corps du système solaire - la réduction,

les positions moyennes et la parallaxe des étoiles - les éclipses - les occultations - les satellites galiléens de Jupiter, et leurs configurations - la libration de la Lune - la polaire - et des données astronomiques diverses. Parallèlement à cette publication, l'*Annuaire du Bureau des Longitudes* rassemblait, outre des éphémérides de faible précision, de nombreux articles à caractère encyclopédique. Il disparaît en 1977. Il est remplacé par *L'Encyclopédie des Sciences de l'Univers*, en 4 volumes, et par une éphéméride annuelle qu'on désigne maintenant sous le nom d'*Ephémérides Astronomiques - Annuaire du Bureau des Longitudes*.

A partir de 1979 paraît la *Connaissance des Temps - nouvelle série*. Les volumineuses tables horaires, journalières ou mensuelles disparaissent, et les éphémérides sont représentées par des séries de polynômes de Chebychev. Sur des intervalles de temps judicieusement choisis, 8 à 10 termes polynomiaux sont généralement utilisés pour représenter avec une grande précision les fonctions du temps qui traduisent la position des astres. Par ailleurs le contenu de l'éphéméride est réduit à l'essentiel; seules sont maintenues les éphémérides des principaux corps du système solaire et celles des satellites galiléens de Jupiter. Globalement, y compris l' "explication et usage", le volume est réduit à 120 pages. De son côté, l'*Annuaire du Bureau des Longitudes* accueille la matière astronomique abandonnée par la *Connaissance des Temps - nouvelle série* et, progressivement, s'enrichit de nouvelles éphémérides. C'est notamment le cas des éphémérides de petites planètes et de comètes.

LE FOND

Dans la *Connaissance des Temps - nouvelle série*, depuis 1984, les théories modernes, élaborées au Bureau des Longitudes pour l'essentiel, ont été introduites. Elles forment la base des éphémérides françaises. Dans le tableau ci-dessous nous avons fait figurer les auteurs des sources qui sont utilisées dans l'une et l'autre formule.

OBJET	ANCIENNE FORMULE	NOUVELLE FORMULE
SOLEIL	Le Verrier	VSOP82 (Bretagnon)
PRECESSION/NUTATION	Newcomb/Woolard	Lieske et al./Wahr
LUNE	ILE (Brown)	ELP2000-82 (Chapront-Touzé, Chapront)
PLANETES	Le Verrier et Gaillot	VSOP82 (Bretagnon) TOP82 (Simon)
PETITES PLANETES (Cérès, Pallas, Junon, Vesta)	Intégration numérique APAE (Duncombe)	Intégration numérique (Rocher)
SATELLITES GALILEENS DE JUPITER	Sampson	Lieske, Arlot

Outre cet enrichissement avec l'introduction de nouvelles solutions, pour suivre les recommandations de l'Union Astronomique Internationale, un certain nombre d'améliorations ont été introduites: l'époque standard est J2000 - le catalogue de référence est le FK5 - l'échelle de temps est le temps dynamique terrestre.

Les *Suppléments à la Connaissance des Temps* paraissent à partir de 1985. Ces nouvelles éphémérides ont été construites sur la base de solutions modernes et bénéficient d'importantes contributions françaises. C'est le cas des théories dont les sources sont listées ci-après:

- Les satellites de Mars, Phobos et Deimos (Chapront-Touzé, 1990);
- Les satellites galiléens de Jupiter (Lieske, 1977) et (Arlot, 1982);
- Les huit premiers satellites de Saturne (Dourneau, 1987), (Rapaport, 1977), (Kozai, 1959) et (Struve, 1930);
- Les satellites d'Uranus (Laskar et Jacobson, 1987).

C'est aussi le cas d'éphémérides construites sur la base d'intégrations numériques ajustées à l'observation:

- Les satellites faibles de Jupiter [J VI, J VII, J VIII et J IX] et le satellite de Saturne, Phobé [S IX] (Borsenberger et Rocher);
- Les éphémérides de 133 astéroïdes de magnitudes, $m \leq 12$, (Rocher).
- Les éphémérides des comètes qui passent au périhélie dans l'année, soit environ une vingtaine d'objets, (Rocher).

En outre, on signalera quelques travaux en cours, décrits à l'occasion des *journées scientifiques 1992*, et qui préfigurent de nouveaux enrichissements des éphémérides françaises:

- L'éphéméride de Thébé qui est un satellite proche de Jupiter, (Colas et Vu);
- Les éphémérides des satellites de Neptune, Protéus et Triton (Colas et Le Guyader);

Enfin, des collaborations sont établies avec les observatoires de Bordeaux et Lille sur les théories du mouvement des satellites de Saturne.

La place originale du Bureau des Longitudes dans l'élaboration des éphémérides

L'Etablissement est à la fois *producteur* - il élabore des théories du mouvement et ajuste les solutions à l'observation - et *artisan* - il met en oeuvre de nouvelles techniques dans la formulation, la représentation et les moyens d'accès aux éphémérides.

PRODUCTEUR

Nous listons ci-dessous quelques travaux majeurs, dont certains remontent à plusieurs années et d'autres sont très récents ou en cours de développement:

- L'élaboration de solutions analytiques originales aux mouvements du Soleil, de la Lune, des planètes et de nombreux satellites (travaux cités);
- L'élaboration d'une nouvelle théorie de la précession (Bretagnon, Chapront, Laskar);
- La mise en place de campagnes d'observations des satellites galiléens: phénomènes mutuels de ces satellites, campagne PHEMU, (Arlot et al.) et observations de nombreux satellites faibles avec la technique de l'astrométrie CCD, (Colas);
- L'ajustement d'intégrations numériques aux observations, en particulier celles des petites planètes du programme HIPPARCOS (Bec-Borsenberger, Morando) et celles de comètes visibles dans l'année (Rocher);
- La participation à l'élaboration d'un système de référence dynamique.

ARTISAN

Plusieurs techniques, algorithmes ou méthodes de calcul ont été développés dans le cadre de la mise en place des nouvelles éphémérides, ou à travers des recherches originales. Ces techniques pour la plupart sont du domaine de la théorie de l'approximation. Elles sont utilisées dans la construction ou la mise en forme des éphémérides; elles ont pour but d'accélérer les algorithmes de calcul ou de compacter le volume de données. Nous mentionnerons, en particulier:

- La méthode d'approximation dite de "Fourier-Chebyshev" pour une représentation compacte d'éphémérides d'objets qui possèdent des mouvements rapides (Chapront, Vu);
- La méthode d'analyse en fréquence de solutions construites numériquement, pour retrouver à partir de solutions numériques une forme analytique (Laskar);
- La représentation en séries d'une seule variable angulaire des théories du mouvement de Jupiter et Saturne (Simon);
- La production de solutions approchées au mouvement des planètes et de la Lune, issues des théories VSOP (Bretagnon) ou TOP (Simon) ou ELP (Chapront-Touze et Chapront). Ces solutions simplifiées ont une précision moyenne et peuvent être utilisées sur de grande échelles de temps, de l'ordre de quelques milliers d'années.

La place de la Connaissance des Temps dans les éphémérides internationales

Si l'on oublie les almanachs et les autres publications saisonnières produites dans différents pays, à usage local et dont la matière scientifique est issue des "grandes éphémérides", il existe 6 éphémérides internationales dont la liste est la suivante:

- THE ASTRONOMICAL ALMANAC ⁽¹⁾. Il résulte d'une fusion depuis 1981 de *The American Ephemeris and Nautical Almanac* et de *The Astronomical Ephemeris*. C'est une éphéméride internationale qui est principalement le fruit de la collaboration entre l'USNO à Washington, et le RGO à Hertsmonceux. Le Bureau des Longitudes y participe pour le mouvement et les configurations des satellites galiléens de Jupiter;
- THE JAPANESE EPHEMERIS ⁽²⁾, élaborée à l'Hydrographic Department (Tokyo);
- ASTRONOMICHESKII EJEGODNIK SSSR, élaborée à l'Institut d'Astronomie Théorique de Saint Petersburg;
- EFEMERIDES ASTRONOMICAS (Observatoire de San Fernando, Espagne);
- THE INDIAN ASTRONOMICAL EPHEMERIS (Meteorological Department, New Delhi);
- EPHEMERIDE CHINOISE;
- LA CONNAISSANCE DES TEMPS ⁽³⁾;

Les éphémérides notées (1), (2) et (3) sont des éphémérides originales, dans la mesure où elles sont le résultat de sources indépendantes. En pratique, les éphémérides des corps principaux (Soleil, Lune et planètes) sont toutes dérivées de l'éphéméride du JPL (Jet Propulsion Laboratory), DE200-LE200. Celle-ci est une intégration numérique introduisant un modèle aussi complet que possible des objets du système solaire et dont les constantes d'intégration ont été déterminées à la suite d'un ajustement au plus riche ensemble d'observations existant. Cette collection d'observations rassemble des sources aussi diverses que les observations télescopiques pour les grosses planètes, les mesures de distance radar pour les planètes inférieures et laser pour la Lune, et les observations spatiales des "landers" sur Mars. *The Astronomical Almanac* est la "source officielle" reproduisant l'éphéméride du JPL (Standish, Williams). *The Japanese ephemeris* est le fruit d'une intégration numérique originale, indépendante de celle du JPL et calée sur DE200-LE200. Enfin, *La Connaissance des Temps* publie le résultat de théories analytiques élaborées au Bureau des Longitudes et ajustées sur DE200-LE200, regardée comme un modèle d'observations.

L'environnement de l'éphéméride mère

Outre la publication des tables, les données de l'"explication et usage" qui accompagnent l'éphéméride sont indispensables à sa bonne utilisation, ainsi qu'à la connaissance précise des constantes physiques et des systèmes de coordonnées qui la composent. L'"explication et usage" comprend des données relatives à la précession, la nutation, les constantes astronomiques, les systèmes de référence les plus répandus, le temps, ainsi que des informations diverses sur les objets du système solaire (masses, distances, dimensions,...), et enfin des formulaires usuels de calcul. Un seul ouvrage général fait la somme des connaissances sur les éphémérides: *The Explanatory Supplement* (1961). Une refonte de l'ouvrage est en cours, avec de nombreuses contributions internationales. Ainsi, le Bureau des Longitudes contribue à la rédaction du chapitre sur les données relatives aux satellites et celui consacré au calcul des éléments moyens des planètes et de la Lune.

Un ouvrage "permanent" accompagnant la publication de la *Connaissance des Temps* est en préparation. Il constitue la "base des éphémérides" développées en France, et clarifie quelques concepts d'astronomie fondamentale sur les repères, les constantes astronomiques, le temps, ... Le plan d'ensemble de cet ouvrage est décrit plus loin.

Il est nécessaire de procéder à une mise à jour permanente des éphémérides en fonction des recommandations de l'Union Astronomique Internationale. Le BdL joue à ce titre un rôle important aux commissions 4 (Ephémérides), 7 (Mécanique céleste) et 20 (Positions et mouvements des petites planètes et des satellites) de l'UAI.

L'évolution des éphémérides

LA CONNAISSANCE DES TEMPS - EPHEMERIDE "PAPIER"

L'évolution de l'éphéméride est poursuivie dans deux directions: d'une part la préparation d'un volume permanent, une "base des éphémérides". - la préparation de cet ouvrage est mentionnée ci-dessus - et, d'autre part, la fusion de l'actuelle *Connaissance des Temps* et de ses *Suppléments*.

LES EPHEMERIDES SUR SUPPORTS INFORMATIQUES

Plusieurs développements sont possibles. Nous citerons les principaux:

- Des fichiers d'éphémérides mères distribués sur supports magnétiques et contenant les données brutes;
- Des fichiers de données annuelles qui accompagnent la publication, sous la forme de disquettes. C'est une évolution qui est actuellement envisagée, des disquettes accompagnant la publication de la *Connaissance des Temps*, éphéméride "papier";
- Des fichiers plus généraux qui constituent une base de données sur le mouvement des corps du système solaire. Nous citerons à titre d'exemple les éphémérides DE102, DE200 construites au JPL, et distribuées sur disque compact;

LES LOGICIELS

Il en existe de plusieurs types:

- Les logiciels généraux qui sont constitués de programmes de calcul pouvant être intégrés dans un environnement "utilisateur". Je mentionnerai un type de diffusion utilisé au BdL avec l'ensemble de programmes EPHAUT, (Ephémérides Automatiques) construites par G. Francou, ainsi que les sous-produits d'EPHAUT;
- Les logiciels "clé en main" qui sont des applications de micro-informatique sur PC ou Macintosh, directement utilisables. Plusieurs produits de cette nature existent au BdL (Francou, Ruatti, Rocher) qui sont adaptés aux calculs d'éphémérides de planètes, de petites planètes, de comètes et de satellites. De son côté, L'USNO a commercialisé un logiciel de ce type dénommé: MICA (Multiyear Interactive Computer Almanac).

LES BASES DE DONNEES

Elles sont distribuées sur réseaux télématiques. Les contributions de l'Etablissement dans ce domaine existent sous deux rubriques (voir plus loin):

- Un serveur MINITEL en direction du grand public - 3616 Code BDL;
- Une base de données sur les satellites naturels dont le projet est à l'étude.

ÉTAT ACTUEL ET ÉVOLUTION FUTURE DE LA CONNAISSANCE DES TEMPS

Jean-Louis Simon

1. État actuel de la Connaissance des Temps (CDT)

A l'heure actuelle, la CDT comporte deux ouvrages principaux annuels :

- la *Connaissance des Temps* proprement dite qui donne les éphémérides pour l'année en cours, du Soleil, de la Lune, des planètes de Mercure à Pluton, des petites planètes Cères, Pallas, Junon, Vesta et des satellites galiléens de Jupiter. Les coordonnées de ces corps sont représentées par des tableaux contenant les coefficients de leurs développements en polynômes de Tchebychev. Ces tableaux sont accompagnés d'un texte d'une cinquantaine de pages contenant de nombreuses explications, des données astronomiques, des formulaires de calcul courants et des exemples.
- les *Éphémérides des satellites de Mars, Jupiter, Saturne et Uranus* pour l'année en cours (Supplément à la CDT) où les coordonnées sont représentées sous forme de fonctions mixtes du temps (termes séculaires et sinusoïdaux).

Il y a entre ces deux ouvrages des doublons (satellites galiléens) et un certain nombre d'inhomogénéités de présentation et d'édition qui ont conduit, en 1990, le conseil scientifique du Service à envisager la mise sur pied, sous le label CDT, d'un ensemble de deux ouvrages :

- une éphéméride annuelle
- un volume explicatif permanent

2. L'éphéméride annuelle

L'éphéméride annuelle regroupera la CDT actuelle et son supplément "satellites". Elle donnera donc, pour l'année en cours, les éphémérides du Soleil, de la Lune, des planètes, des quatre principales petites planètes et des satellites de Mars, Jupiter, Saturne, et Uranus. Elle gardera les principales caractéristiques des deux publications, en particulier en ce qui concerne les sources des éphémérides et le mode de représentation choisi (polynômes de Tchebychev ou fonctions mixtes). Le texte explicatif sera réduit par rapport au texte de l'actuelle CDT.

L'ouvrage sera accompagné d'une (de) disquette(s) permettant de calculer, sur micro-ordinateurs, les éphémérides publiées.

La mise en œuvre de cette publication s'effectue sous la responsabilité de J.L. Simon, L. Bergeal (édition et diffusion), J.E. Arlot (satellites), G. Francou et Ch. Ruatti (informatique et disquette).

A l'heure actuelle la partie "fabrication des tableaux" de l'ouvrage est très avancée ; les parties "rédaction du texte explicatif" et "fabrication de la disquette" n'ont pas encore été sérieusement entreprises.

3. Le volume explicatif permanent : caractéristiques générales

Cette publication, de 200 pages environ, devrait être intermédiaire entre le texte actuel de la CDT un peu étoffé et l'Explanatory Supplement et permanente pour une durée de 5 à 10 ans.

Nous souhaitons que cet ouvrage dépasse largement le cadre de la CDT et donne, en quelque sorte, les *bases* d'astronomie et de mécanique céleste nécessaires à la compréhension et à l'utilisation des *éphémérides*. Dans cet esprit, ce volume permanent (dont le titre reste à trouver) traiterait les chapitres suivants :

Introduction

1. Définitions et données astronomiques
 2. Échelles de temps
 3. Coordonnées et systèmes de référence
 4. Mouvement des corps du système solaire et sources des éphémérides
 5. Présentation des éphémérides de la CDT
 6. Éphémérides pour les observations physiques
- Ces six grandes parties étant divisées en de nombreux chapitres et pouvant être illustrées d'exemples, de tables, de figures, etc.

Cet ouvrage est, bien entendu, un *ouvrage collectif*. Son comité de rédaction est formé de M. Chapront, B. Morando, J.L. Simon et W. Thuillot mais il fait appel à la collaboration de nombreux chercheurs intérieurs ou extérieurs au service, voire étrangers (V.A. Brumberg). Les problèmes d'édition et de diffusion liés à sa réalisation sont sous la responsabilité de L. Bergeal.

4. Le volume explicatif permanent : état actuel

Le comité de rédaction a reçu les premières versions d'un bon nombre de manuscrits, représentant environ la moitié de l'ouvrage. Nous allons rapidement décrire dans quel esprit les auteurs ont rédigé leurs contributions.

Définitions et données astronomiques

Cette partie est entièrement rédigée par A. Borsenberger. Elle contient une présentation des systèmes d'unités (système fondamental et système UAI d'unités astronomiques) et du système UAI de constantes astronomiques, un grand nombre de données astronomiques et une analyse des valeurs successives des constantes astronomiques.

Échelles de Temps

Cette partie est rédigée par F. Mignard et B. Morando. Elle comporte une étude de l'évolution des échelles de temps, un chapitre sur le TAI (description des étalons de fréquence, discussion de leur stabilité, réalisation pratique du TAI), un chapitre sur les temps dynamiques et leur relation avec le TAI et un chapitre sur le temps universel coordonné.

Coordonnées et systèmes de référence

Cette partie contient un grand nombre de chapitres. Nous avons reçu :

- *Systèmes de référence et changement de coordonnées*

Ce chapitre est rédigé essentiellement par M. Chapront. Il distingue le concept théorique, désigné par système de référence, de sa matérialisation astronomique, désignée par repère et étudie les systèmes de référence en mécanique newtonienne et en mécanique relativiste. Il présente un certain nombre de repères célestes couramment utilisés et décrit les coordonnées publiées dans la CDT. Il étudie enfin les transformations entre repères terrestre et céleste (sous-chapitre rédigé par N. Capitaine).

- *Précession-Nutation*

Ce chapitre est rédigé par N. Capitaine et P. Bretagnon. Les auteurs donnent une définition du phénomène et de ses effets, une description et un historique des différentes composantes et une explication schématique de la Précession-Nutation luni-solaires. Ils décrivent la représentation classique des effets de Précession-Nutation et présentent et discutent les formules.

Mouvement des corps du système solaire et sources des éphémérides

Cette partie contient également un grand nombre de chapitres. Nous avons reçu :

- *Théories planétaires* (P. Bretagnon, J.L. Simon)
- *Théories du mouvement de la Lune* (M. Chapront)
- *Théories du mouvement des satellites galiléens* (J.E. Arlot, J.L. Sagnier, W. Thuillot, D.T. Vu)
- *Théories du mouvement des satellites de Saturne* (M. Rapaport)

D'une manière générale les auteurs se sont attachés, dans leurs articles, à faire un historique du sujet traité, à présenter et analyser la dynamique du problème et à expliquer l'élaboration des éphémérides à partir des théories. Chaque chapitre comporte, bien entendu, un certain nombre d'aspects plus spécifiques comme, par exemple, une présentation des formules donnant les éléments orbitaux des corps (Théories planétaires et lunaires), une description des phénomènes (Satellites galiléens), etc.

5. Conclusion

La refonte de la CDT est donc engagée. La mise en œuvre du volume permanent qui représente la partie du projet la plus ambitieuse et la plus difficile à réaliser est bien entamée. Nous remercions vivement les auteurs (en particulier ceux extérieurs au Service) qui nous ont déjà envoyé leur manuscrit et nous souhaitons bon courage aux autres!

EPHEMERIDES DES SATELLITES NATURELS DES PLANETES

Jean-Eudes Ariot

Origine du projet

Le projet d'éphémérides des satellites naturels des planètes publiées par le Bureau des Longitudes s'inscrit dans la tradition de la Connaissance des Temps. Depuis très longtemps, celle-ci donne des indications sur les positions et configurations du système des satellites galiléens de Jupiter. En particulier, la prédiction de leurs phénomènes (éclipses, occultations par Jupiter) revêtait aux siècles passés, une importance stratégique. Au cours du temps, une évolution a naturellement modifié ces données. Ainsi, la Connaissance des Temps d'avant 1979 contenait outre les prédictions

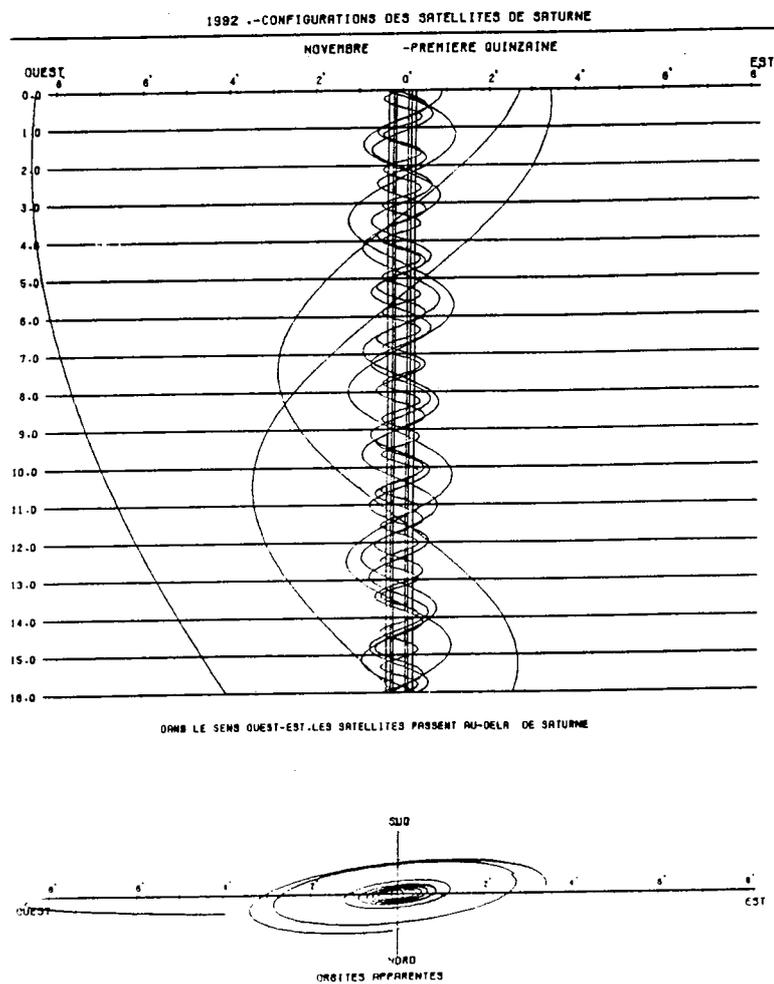


Figure n°1
Configurations des satellites de Saturne

des phénomènes, des diagrammes montrant la configuration du système jovien et des éléments permettant de calculer les positions des satellites galiléens relativement à la planète Jupiter pour un observateur terrestre. La complexité de la théorie du mouvement de ces corps ne permettait cependant pas une représentation tabulée précise. Les calculs manuels ne fournissaient donc qu'une précision médiocre, permettant seulement l'identification des satellites.

En 1979, la Connaissance des Temps s'est transformée pour présenter les éphémérides sous forme d'une représentation en coefficients de Tchébycheff permettant un gain de place et une meilleure précision de calcul que des valeurs tabulées. Les éphémérides des satellites galiléens furent alors présentées sous cette même forme de coefficients de Tchébycheff malgré un lourd handicap: la rapidité des satellites autour de Jupiter ne permettait de représenter le mouvement que sur des intervalles de temps très courts (un jour pour Io). Seul le gain en précision justifiait cette nouvelle représentation. Dans le même temps, les configurations et les phénomènes disparaissaient de la Connaissance des Temps "nouvelle série" du fait du caractère d'éphémérides pour calculateurs qu'elle prenait alors. Les phénomènes et les configurations, toujours utiles pour les observateurs, étaient alors publiés dans un "Supplément à la Connaissance des Temps" avec une précision supérieure (configurations donnant aussi la position en latitude et phénomènes mieux décrits).

En 1980, la Terre passait dans le plan des anneaux de Saturne et cette particularité devait permettre la découverte de nouveaux satellites de Saturne. Pour cela, les observateurs eurent besoin d'éphémérides précises pour bien identifier les satellites connus se déplaçant dans le champ observé. Nous fûmes alors amenés à publier les éphémérides des huit premiers satellites de Saturne sous forme de coefficients de Tchébycheff ainsi qu'un nouveau "Supplément à la Connaissance des Temps" contenant les configurations de ces mêmes satellites (voir figure n°1).

En 1982, un "supplément à la Connaissance des Temps" donnant les éphémérides des satellites VI, VII, VIII et IX de Jupiter et IX de Saturne sous forme de coefficients de Tchébycheff a également vu le jour.

	pour une année:		d'intervalles	
	nombre:	de coefficients;	Tchéb.	F. mixtes
	Tchéb.	F. mixtes	Tchéb.	F. mixtes
Io (J1)	5840	1710	365	95
Europe (J2)	2928	1710	183	95
Ganymède (J3)	1472	864	92	48
Callisto (J4)	992	864	62	48
Mimas (S1)	12410	3680	730	184
Encelade (S2)	6570	480	365	24
Téthys (S3)	5840	480	365	24
Dioné (S4)	3294	480	183	24
Rhée (S5)	2196	480	122	24
Titan (S6)	828	576	46	36
Hypérion (S7)	828	768	46	48
Japet (S8)	414	288	23	24

Table n°1

Gain de place du aux fonctions mixtes par rapport aux coefficients des polynômes de Tchébycheff.

En 1985, à la suite des travaux de Chapront et Vu sur les représentations des mouvements rapides dans le système solaire, il est apparu qu'une représentation des éphémérides des satellites naturels des planètes sous forme de fonctions mixtes directement dépendant du temps permettait de conserver la précision de la représentation en polynômes de Tchébycheff en utilisant moins de coefficients numériques. La table n°1 donne l'exemple de quelques satellites et l'on peut constater le gain obtenu pour une représentation du mouvement sur un an. Il devenait alors possible de publier des éphémérides pour les principaux satellites des planètes. En 1986, un nouveau "Supplément à la Connaissance des Temps" était publié donnant les éphémérides des satellites galiléens de Jupiter, des huit premiers satellites de Saturne et des cinq satellites d'Uranus. Quelques années plus tard, on y introduisait les satellites de Mars. Cet ouvrage est actuellement publié et distribué par les Editions de Physique et est accompagné d'une diskette pour micro-ordinateur.

Effets à prendre en compte	Effet maximal	Conservation des distances: à la planète	entre les satellites
Précession 1950.0/J2000	1".1	Oui	Oui
Repère FK4/FK5	< 0".001	Oui	Oui
Aberration repère apparent/astrographie			
aberration annuelle	0".03	Non	Non
nutaton	0".01	Oui	Oui
Repère tangentiel/différentiel	0".3	Non	Non
Temps de lumière différentiation Planète/satellites	0".015	Non	Non
Ephémérides des planètes DE102/D200/BDL82/Le Verrier	0".002	Oui	Oui
Déflexion relativiste de la lumière (planète)	0".025	Non	Non
Coordonnées topocentriques/géocentriques	0".01	Non	Non
Centre planète/barycentre du système	0".1	Non	Oui
Théorie du mouvement des satellites erreur interne (développement de la théorie)	< 0".001	Non	Non
erreur externe (ajustement des constantes sur les observations)	> 0".1	Non	Non
Précision de la représentation	0".015	Non	Non

Table n°2

Les utilisateurs des éphémérides

Quels sont les utilisateurs de nos éphémérides? Celles-ci sont utilisées pour diverses applications:

- préparation des observations et identification des champs (souvent l'observation de certains satellites nécessite des configurations particulières du système). Pour cela on utilise plutôt les configurations qui sont d'un emploi très simple et d'une précision souvent suffisante (environ 5 secondes de degré).
- identification des objets après observation et analyse de la qualité des données obtenues. Il est impératif d'utiliser alors des coefficients pour retrouver une précision maximale (de l'ordre de 0.1 seconde de degré).
- guidage des télescopes et des radio-télescopes: pour cela la précision requise n'est pas très importante mais les coefficients sont très pratiques: ils permettent de programmer le suivi automatique du télescope pour une durée de quelques jours.
- observation indirecte des planètes: il est souvent plus facile d'observer un satellite que la planète elle-même (observations méridiennes ou photographiques sur fond d'étoiles) et il est nécessaire de disposer des éphémérides des satellites pour retrouver la position de la planète. Pour cela on utilise les coefficients car on a besoin de la précision maximale.

Notons que les utilisateurs sont aussi bien des astrométristes, des mécaniciens célestes que des planétologues s'intéressant à la nature physique des objets observés.

Des éphémérides pour quels satellites?

S'il est souhaitable de publier les éphémérides d'un maximum de satellites, il est important de ne publier que celles dont la précision a un sens, c'est-à-dire qui sont fondées sur des théories de qualité. Les coefficients garantissent un écart à la théorie de base inférieur à $0''.015$ et il est important que la théorie elle-même ait une précision externe (par rapport aux observations) meilleure que $0''.15$. C'est pour cela que nous nous sommes limités à publier seulement les éphémérides des satellites dont nous sommes sûrs. Ces éphémérides sont fondées sur les travaux de:

satellites de Mars:	M. Chapront-Touzé
satellites galiléens de Jupiter:	J.H. Lieske/J.E. Arlot
	R.A. Sampson/
satellites faibles de Jupiter:	P. Rocher
huit premiers satellites de Saturne:	G. Doumeau/M. Rapaport/ Y. Kozai/ L. Voltjer/G. Struve
satellite IX de Saturne:	A. Bec-Borsenberger
satellites d'Uranus:	J. Laskar/ R.A. Jacobson

Nous envisageons la publication des éphémérides du satellite Thébé de Jupiter (travaux de D.T. Vu et F. Colas) et des satellites de Neptune, Triton, Néréïde et Protéus (travaux de C. Le Guyader et F. Colas).

Qu'est-ce qu'une éphéméride?

Une éphéméride est une représentation du mouvement d'un corps céleste qui permet d'obtenir sa position à une date donnée. Cette position est, dans le cas de nos éphémérides, une position correspondant à l'arrivée du signal lumineux sur la Terre destinée plus particulièrement à un observateur. Pour la plupart des satellites, cette position est donnée dans un repère différentiel, centré sur la planète. Ce repère est choisi tangent à la sphère céleste pour avoir des données directement

comparables aux observations effectuées dans la grande majorité des cas sur plaques photographiques ou sur cibles CCD. Une correction sera nécessaire pour les observations directes d'angles (observations méridiennes, micrométriques ou sur plaques de télescope de Schmidt).

La précision des éphémérides est une information essentielle dépendant de nombreux facteurs intervenant lors du calcul. La publication d'éphémérides de satellites naturels des planètes est récente et il n'existe pas de conventions internationales pour cela. Si le repère J2000 a été adopté récemment, de nombreuses incertitudes demeurent sur le mode de calcul des positions. La prise en compte d'effets faibles dans les calculs devient nécessaire, mais jusqu'à présent, la mauvaise qualité des théories conduisait à négliger des effets qu'il faut impérativement prendre en compte désormais. Le tableau n°2 rassemble ces effets et leur influence maximale sur la précision des éphémérides.

Conclusion

La publication des éphémérides des satellites naturels des planètes, qui a débuté en 1985, est maintenant bien rodée et attendue des utilisateurs. Nous avons donc envisagé la publication des ces éphémérides et de celles des planètes, du Soleil et de la Lune dans un même volume dénommé "Nouvelle Connaissance des Temps", accompagné lui-même d'un ouvrage d'explications très complet. Une diskette accompagnera cette publication. Selon l'avancement des travaux, les éphémérides de satellites supplémentaires seront ajoutées. Il est cependant nécessaire d'avoir une maintenance suivie de ces éphémérides: tout d'abord par l'élaboration de nouvelles théories (en particulier pour les satellites de Saturne) et aussi par le suivi observationnel des satellites afin de réajuster régulièrement les modèles.

LA CONNAISSANCE DES TEMPS - ÉDITION - DIFFUSION

Liliane Bergeal

La Connaissance des Temps fut créée en 1679, sous Louis XIV.
Le Bureau des Longitudes créé en 1795, par la Constituante, fut chargé à partir de cette date, de la publication de cet ouvrage.

La Connaissance des Temps comportait alors environ 100 pages et contenait les levers et couchers du Soleil et de la Lune à Paris, les coordonnées journalières du Soleil et de la Lune et des cinq grosses planètes, ascensions droites et déclinaisons de quelques étoiles, dates et heures des éclipses du Soleil et de la Lune.

Au cours du 19^e siècle le nombre de pages de l'ouvrage passait de 100 à 200 environ. En effet, en 1834, 150 pages supplémentaires étaient introduites, à l'usage des marins, pour arriver en 1918 à la création des Éphémérides Nautiques. Les éphémérides du Soleil et de la Lune et des cinq grosses planètes y étaient présentées de façon journalière et non pas par astre comme dans la Connaissance des Temps, ceci afin de permettre aux marins, le calcul du "point astronomique".

En 1911, un congrès international des bureaux d'éphémérides se tenait à Paris. Deux recommandations importantes y étaient formulées :

- répartir les tâches entre les différents bureaux,
 - choisir librement les sources des éphémérides pour chacun de ces bureaux.
- L'application de ces décisions est, en fait, intervenue en totalité en 1917.

La Connaissance des Temps s'est enrichie au cours des années jusqu'à atteindre, en 1979, 680 pages dont 180 pages d'explications et usages et 500 pages d'éphémérides journalières. Gauthier Villars, libraire du Bureau des Longitudes depuis plus d'un siècle, renonçait alors à éditer un ouvrage devenu trop lourd et qui se vendait mal.

Le Bureau des Longitudes conscient de ce problème depuis plusieurs années réalise alors une édition 1978, expérimentale, interne au service; les éphémérides sont désormais représentées sous forme de coefficients de polynômes de Tchebychev. Un calcul, réalisable sur calculette, est nécessaire pour obtenir, pour une date déterminée, la valeur correspondante de l'éphéméride précédemment obtenue par interpolation. Cette forme compacte de présentation réduit sensiblement le nombre de pages. La partie texte est également diminuée, l'ouvrage se trouve ainsi ramené au 1/5^e de son volume précédent.

La Connaissance des Temps 1979 "nouvelle série" paraît sous cette nouvelle forme, 301^e édition d'un ouvrage paru sans interruption depuis sa création.

Dans cette nouvelle présentation manquent les phénomènes et configurations des satellites de Jupiter, les positions des étoiles, les occultations des planètes et des étoiles. Ces informations se trouvent, avec une précision inférieure, dans l'Annuaire du Bureau des Longitudes.

La Connaissance des Temps "nouvelle série" se présente sous la forme d'un ouvrage broché de format 21 × 29,7.

Le manuscrit comporte 2 parties :

- un texte à saisir, environ 50 pages dont 5% sont à modifier chaque année,
- une bande magnétique qui contient les tables numériques, représentation des coordonnées des astres par les développements en polynômes de Tchebychev, établis à partir des théories élaborées au Bureau des Longitudes. Ces quantités sont enrichies d'informations typographiques qui permettent à l'imprimeur de composer automatiquement son texte.

Désormais, en amont, le travail de l'auteur s'alourdit, celui-ci devient concepteur de la page imprimée, le travail est de ce fait allégé pour l'imprimeur et devient quasiment nul pour le correcteur d'épreuves.

Le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine imprime à Brest notre ouvrage. Dunod-Bordas, groupe d'éditeurs qui a repris Gauthier Villars, en assure la distribution.

Après avoir acheté 500 exemplaires, puis 350 exemplaires annuels, et réalisé une trop faible vente, Dunod-Bordas renonce à partir de l'édition 1985 à distribuer notre publication.

Le Bureau des Longitudes, confronté à cette nouvelle difficulté, établit un fichier d'organismes intéressés par cet ouvrage : bibliothèques scientifiques, librairies spécialisées, laboratoires, clubs d'astronomes amateurs ... , réalisant un mailing à la sortie de la Connaissance des Temps, il expédie des bons de commande.

Cette distribution présente l'inconvénient,

- de ne pas permettre la consultation de l'ouvrage (la librairie du CNRS réticente n'a autorisée que durant deux ans la présentation de notre publication dans ses librairies)
- de contraindre l'acheteur au paiement préalable.

Le SHOM présente la Connaissance des Temps dans son catalogue, diffuse un dépliant pour l'édition 92, mais ces tentatives de promotion ne touchent pas le public intéressé.

En 1986, nous contactons les Éditions de Physique pour distribuer notre ouvrage. Elles considèrent que 85 FF prix de l'édition 1985, n'est pas un prix "marché" et doit être augmenté (le coût de distribution s'établit en pourcentage sur le prix de vente).

Dans les années qui vont suivre, le prix de la Connaissance des Temps passera à 120 FF dans l'édition 1986 pour se stabiliser à 210 FF depuis l'édition 1990.

Les suppléments à la Connaissance des Temps

Quatre ouvrages sont imprimés depuis 1980, ils contiennent les informations qui n'avaient plus été publiées dans la Connaissance des Temps "nouvelle série".

- Les phénomènes et configurations des satellites de Jupiter et de Saturne.
- Les éphémérides des huit premiers satellites de Saturne.
- Les éphémérides des satellites faibles de Jupiter et Saturne.

Ces ouvrages sont réalisés au Bureau des Longitudes, à l'imprimerie de Meudon et distribués par l'Association Française d'Astronomie.

- Les éphémérides des satellites de Jupiter, de Saturne, d'Uranus et de Mars (depuis 1991), qui sont éditées et distribuées pas les Éditions de Physique.

L'avenir

Nos préoccupations sont d'améliorer et d'enrichir cet ouvrage, d'en baisser le coût de réalisation, de le mieux distribuer.

A partir de deux ouvrages, en concevoir un seul constitué, d'une part, de la partie numérique de la Connaissance des Temps (soit 170 pages) et d'autre part des tableaux numériques du supplément à la Connaissance des Temps, éphémérides des satellites de Mars, Jupiter, Saturne et Uranus, (soit 100 pages) dont on aura supprimé les éphémérides des satellites galiléens de Jupiter, qui figurent dans l'actuelle Connaissance des Temps.

On obtient alors un ouvrage d'environ 200 pages avec une partie réduite d'explications et usages d'environ 20 à 30 pages.

Les tableaux seront sortis en TEX sur une imprimante haute définition et prêts à être clichés pour la publication.
 Une disquette accompagnera l'ouvrage.
 La réalisation de cet ouvrage sera confiée aux Éditions de Physique qui en assurera la distribution, le Bureau des Longitudes pourrait participer à une campagne de promotion de l'ouvrage.

Il y a certainement un faible nombre de lecteurs de cet ouvrage, encore faut-il les identifier puis les fidéliser, c'est ce qui doit être notre préoccupation majeure afin d'assurer la survie d'un ouvrage qui se doit de rester un ouvrage de référence.

CONNAISSANCE DES TEMPS 1981-1992

EDITION	TIRAGE	PRIX DE L'OUVRAGE	NBRE EX. VENDUS PUBLIC	NBRE EX VENDUS REDUC. 30%	NBRE EX. DISTRIBUES PAR LE BDL	EDITION
1981	1200	56 F	103	4	110	1981
1982	"	65	80	6	"	1982
1983	"	75	114	.	"	1983
1984	"	80	95	.	"	1984
1985	1200	85	273	2	"	1985
1986	600	120	278	18	"	1986
1987	"	140	162	29	"	1987
1988	"	200	174	33	"	1988
1989	"	210	104	10	"	1989
1990	600	210	98	21	"	1990
1991	500	210	92	11	"	1991
1992	400	210 F	74 au 14/2/92	5	"	1992

SUPPLÉMENTS A LA CONNAISSANCE DES TEMPS

Liste	Année de première sortie	Mode de représentation	Imprimeur
1 - Satellites galiléens de Jupiter Phénomènes et configurations	1980	-	BdL puis imprimerie Meudon
2 - Satellites de Saturne Configurations	1982	-	BdL puis imprimerie Meudon
<i>2bis</i> - 8 premiers Satellites de Saturne Éphémérides	1981	Coef. de Polynomes de Tchebychev	BdL
3 - Sat. faibles de Jupiter 4 premier et Phoebé Éphémérides	1981		BdL
4 - Sat. de Jupiter de Saturne, Uranus + Mars à partir de 1991 Éphémérides	1985	Fonctions mixtes du temps	Ed. Physiques

Diffusion des suppléments à la Connaissance des Temps

Années	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991
Satellites galiléens de Jupiter Phénomènes et configurations <i>Distribution interne & aux Observatoires</i> <i>Nombre d'exemplaires vendus</i> <i>Editeur Bureau des Longitudes</i>	76 3	111 1	97 2	96 1	179 65	38 30	62 26	66 39	87 55	83 64	127 83
Satellites de Saturne Configurations <i>Distribution interne & aux Observatoires</i> <i>Nombre d'exemplaires vendus</i> <i>Editeur Bureau des Longitudes</i>	42 3	94 1	87 1	36 -	95 6	63 30	62 23	66 26	66 21	85 54	110 58
Satellites faibles 4 satellites de Jupiter et Phobé Ephémérides <i>Distribution interne & aux Observatoires</i> <i>Nombre d'exemplaires vendus</i> <i>Editeur Bureau des Longitudes</i>						4	12	25	39	34	- -
Satellites de Mars, Jupiter, Saturne et Uranus Ephémérides <i>Distribution interne & aux Observatoires</i> <i>Nombre d'exemplaires vendus</i> <i>Editions de Physique</i>						40 88	21 65	24 52	35 68	36 73	34 96

LES ÉPHÉMÉRIDES ASTRONOMIQUES ÉDITION ET PROGRAMMES

P. Rocher

Modifications effectuées depuis 1981

Depuis 1981, nous avons fait évoluer le contenu de l'Annuaire du Bureau des Longitudes ainsi que sa réalisation. Au cours des années 1982 - 1984, nous avons informatisé la totalité des calculs d'éphémérides et automatisé les différents tracés (courbes d'éclipses, hors-textes). En 1984, conformément aux recommandations de l'Union Astronomique Internationale, nous avons introduit les nouvelles constantes astronomiques ; de plus, nous avons pris comme sources pour la construction de nos éphémérides les nouvelles théories élaborées au Bureau des Longitudes. En 1985, les chapitres relatifs aux marées et à la déclinaison magnétique ont été supprimés et remplacés par des éphémérides de comètes et d'astéroïdes. Nous avons changé d'éditeur en 1989. Au cours des années 1990 et 1991, nous avons automatisé l'édition de l'Annuaire à l'aide du logiciel T_EX et nous avons également écrit une nouvelle version de tous nos programmes d'éphémérides.

Le langage T_EX

C'est un langage d'édition très près de la typographie qui permet la saisie des formules mathématiques et des tableaux. Il a été mis au point par Donald E. Knuth de l'université Stanford. Son utilisation est très répandue dans le domaine scientifique, il fonctionne sur de très nombreux types d'ordinateurs (Vax, IBM PC, Macintosh), il permet des sorties de qualité sur des imprimantes laser et même des sorties sur des photocomposeuses. Il possède les avantages des langages de programmation, avec, en plus, la possibilité d'intégrer des instructions T_EX dans les formats d'écriture des autres langages informatiques (Fortran, PL1, Pascal).

Avantages et inconvénients de l'édition informatisée

Outre la baisse du coût de fabrication de l'ouvrage (les pages sont directement clichées par l'imprimeur), l'informatisation de l'édition apporte de nombreux avantages. Dans le cas de l'Annuaire, l'avantage majeur est l'automatisation de la sortie des tableaux d'éphémérides, qui représentent environ 67% de l'ouvrage. Le texte permanent est, bien sûr, saisi une fois pour toute (20% de l'ouvrage) et il est possible d'insérer des dessins. À ces avantages vient s'ajouter un gain important de temps dans la préparation des manuscrits ; de plus, la correction des épreuves est en grande partie supprimée.

Le seul inconvénient de ce procédé est le gros travail de préparation, de programmation et de vérification qu'a demandé la réalisation de cette automatisation.

Édition automatique des tableaux

L'édition automatique des tableaux d'éphémérides se fait en plusieurs phases. Dans un premier temps, on calcule les éphémérides sur les ordinateurs du CIRCE, ces éphémérides sont sauvegardées sur des fichiers en code EBDIC. Puis des programmes transforment ces fichiers en fichiers exploitables par le langage T_EX, en y incorporant des ordres spécifiques à ce langage. Ces fichiers sont ensuite transférés sur un ordinateur IBM PC, à l'aide du logiciel Arbiter ; à cette occasion ils sont transformés en code ASCII. Ces fichiers sont alors de nouveau transférés sur un Macintosh pour être incorporés dans le texte. Les nombreux transferts que nous effectuons ont demandé une mise au point délicate, en effet, le codage EBDIC des caractères accentués et des caractères spéciaux du langage T_EX a dû être choisi de manière à obtenir les caractères souhaités à la fin de tous les transcodages.

Saisie non automatique de tableaux

Certains tableaux, qui ne sont pas des tableaux d'éphémérides, ont été saisis à la main. Ils sont répertoriés dans la liste suivante :

Occultations des étoiles par la Lune	IX	} D. Jourdain et Th. Derouazi.
Fêtes(*)	I	
Heure légale en France(*)	II	} P. Rocher.
Données relatives aux planètes(*)	II	
Liste des constellations	VII	
Amas d'étoiles, nébuleuses et galaxies	VII	
Étoiles doubles	VII	
Phénomènes astronomiques(*)	IX	
Éclipses de Lune et de Soleil(*)	X	
Liste des coordonnées des villes de France ...	X	

(*) ces tableaux sont à saisir chaque année.

Texte et dessins

Le chapitre deuxième a été saisi, pour l'Annuaire 1992 par Mme. Raoult. On a pu récupérer une partie des textes de l'Annuaire 1992, que Masson avait fait saisir en L^AT_EX , mais il y a eu de nombreuses corrections à faire, notamment au niveau de la mise en page. Une partie de ce texte est à modifier tous les ans (les exemples des chapitres III et VI, ainsi que les données sur le temps). Les dessins fixes (une dizaine environ) ont été réalisés sur Macintosh et insérés dans le texte T_EX . Huit autres dessins non fixes ont été réalisés également sur Macintosh et seront à refaire tous les ans.

Nouveaux programmes d'éphémérides

Nous avons profité de l'automatisation de l'édition de l'Annuaire, pour écrire une nouvelle version des programmes de calculs des éphémérides. La version précédente était assez disparate, elle se composait de nombreux programmes écrits par M. Catoire dans lesquels on avait remplacé, en 1984, les anciennes théories (Le Verrier et Gaillot pour le Soleil et les planètes, Brown pour la Lune) par les nouvelles théories élaborées au Service des Calculs du Bureau des Longitudes. De plus, l'utilisation d'un certain nombre de simplifications et d'approximations, qui n'étaient pas toujours identiques d'un programme à l'autre, nous ont incité à écrire la totalité des programmes sous une forme homogène et plus rigoureuse.

La liste suivante donne un aperçu des programmes qui ont été écrits ou modifiés :

Lune	IV	} G. Francou.
Soleil	IV	
Planètes	V	
Éphémérides pour les observations physiques	VI	
Éphémérides de la polaire	IX	
Concordances des calendriers	I	} P. Rocher.
Éphémérides des astéroïdes (J2000)	V	
Éphémérides des comètes (J2000)	VIII	
Positions moyennes des étoiles	IX	
Éclipses du Soleil	X	
Phénomènes des satellites galiléens	VII	} W. Thuillot et DT. Vu.
Éphémérides des satellites de Saturne	VII	

Les résultats donnés par ces nouveaux programmes ont été vérifiés par rapport à l'ancienne version et par rapport aux éphémérides américaines.

Correction des épreuves

La correction des épreuves est organisée par L. Bergeal ; cette année le travail a été triple, en effet, il a fallu assurer la correction des épreuves de l'Annuaire 1992, le pointage des listings des nouveaux programmes et le pointage du texte T_EX de l'Annuaire 1993. Les techniciens qui ont participé à ce travail sont les suivants : V. Raoult, S. Sainson, Th. Derouazi, M. Bonnaventure, M. Heurtier et D. Jourdain.

SERVICE MINITEL

G. Satre

Aux précédentes journées (fév.90) ont été décrits les éléments nécessaires au développement d'un service Minitel et le processus à suivre pour la réalisation.

Durant ces deux années les étapes furent les suivantes :

- . réalisation d'une maquette pour juillet 90,
- . mise au point opérationnelle de la version 1.0 pour l'ouverture du Service le 24 avril 1991,
- . mise en service régulière de nouvelles rubriques (vers 1.1 sept 91, vers 1.2 déc.91).

La version 2.0 mise en service le 14 février 1992 met à disposition du public 17 rubriques, citées ci-dessous, dont le début des éphémérides astronomiques

*la présentation du BDL et ses publications,
la définition et la concordance des calendriers,
les fêtes légales et religieuses,
l'heure légale, le jour de la semaine, les saisons,
les phases de la Lune, les éclipses de Lune et de Soleil,
les levers et couchers de Lune et de Soleil,
la hauteur et l'azimut du Soleil,
des informations sur les positions des satellites naturels,
les phénomènes des satellites galiléens.*

Des statistiques établies sur 1991 donnent une moyenne journalière de 14 appels d'une durée de 4 à 5 mn, la répartition de ces appels se faisant sur l'ensemble du territoire.

Une seconde opération de promotion, la première a eu lieu à l'ouverture du service, est lancée (affiches, communications, encarts joints aux courriers...).

Des rubriques complétant les éphémérides de planètes, le ciel du mois, l'enrichissement du fichier des villes sont en cours.

Dans l'hypothèse où le serveur actuel (CIRCE) ne maintiendrait plus les logiciels GTMOSI, une convention CNRS-BDL a été signée à l'ouverture du service définissant les conditions d'exploitation, des contacts ont été pris avec le CNUSC qui est équipé de ces logiciels. L'accueil a été favorable et une étude de transfert des applications vers cet autre serveur est en cours.

RENSEIGNEMENTS 1990 - 1991

Liliane Bergeal

Le service des renseignements du Bureau des Longitudes, opérationnel depuis de nombreuses années, est placé depuis trois ans sous la responsabilité de Pierre Bretagnon assisté de Liliane Bergeal, avec comme collaborateurs, Maryse Bonnaventure et Michel Heurtier au secrétariat, et pour des interventions spécifiques, Gérard Francou, Patrick Rocher et d'autres chercheurs du service des calculs.

Renseignements

Les demandes de renseignements sont reçues soit :

- par téléphone, au secrétariat qui répond dans certains cas immédiatement, dans d'autres cas, transfère l'appel vers d'autres collaborateurs du service des calculs, ou invite son correspondant à nous écrire.
- par courrier, nous avons reçu en 1989, 350 demandes de renseignements, 392 en 1990 et 316 en 1991, ces demandes font l'objet de réponses plus ou moins rapides de notre part, suivant l'importance de l'étude qu'elles nécessitent.

NATURE DES DEMANDES

Elles peuvent être regroupées en quelques grands thèmes (liste non exhaustive) :

- heures des levers et couchers du Soleil et de la Lune, phases de la Lune,
- éphémérides de corps du système solaire,
- formulaires astronomiques particulièrement importants depuis le développement de l'informatique,
- explications théoriques de questions d'astronomie, ...

ORIGINE

- organismes officiels (CNES, CNRS, facultés, ministères, centre d'archéologie, muséum, ...),
- étudiants ou chercheurs, pour une étude spécifique qui demande en général un travail important (cette année, étude sur la navigation astronomique de Christophe Colomb).
- architectes,
- services de police et de justice,
- fabricants de calendriers,
- particuliers, amateurs d'astronomie,
- producteurs de films,
- ...

Effet MINITEL

Le service MINITEL du Bureau des Longitudes est ouvert depuis mai 1991. Son existence est mentionnée dans nos courriers réponses, et le secrétariat, lorsqu'il y a lieu, y renvoie ses interlocuteurs. De plus, le secrétariat est invité à recueillir tous les commentaires de l'utilisateur du MINITEL afin d'améliorer notre service.

PROJET

Trois ans d'expérience avec un bon échantillonnage des demandes de renseignements, nous font souhaiter l'acquisition d'un micro-ordinateur qui contiendrait une bibliothèque des programmes tout à fait adaptés à la fourniture des réponses. Le secrétariat pourrait en assurer l'exploitation.

PROJET DE CENTRE DE DONNEES SUR LES SATELLITES NATURELS DES PLANETES

Jean-Eudes ARLOT

Origine du projet: pourquoi un centre de données?

Une enquête effectuée parmi les membres de l'UAI, principalement ceux de la commission 20, a montré récemment que le nombre de chercheurs et d'astronomes intéressés par les satellites naturels des planètes allait croissant, qu'il s'agisse d'observateurs, d'astrométristes, de théoriciens, de mécaniciens célestes ou de planétologues. En particulier, 73 équipes d'observateurs des satellites naturels des planètes ont été recensés. Ainsi, une structure semblable au Minor Planet Center (Centre de données rassemblant toutes les données astrométriques sur les astéroïdes et fournissant des éphémérides) s'avère désormais nécessaire pour les satellites naturels. Ce centre aura pour but principal de rassembler et de distribuer les observations astrométriques des satellites naturels des planètes. Il est, en effet, actuellement très difficile de rassembler une quantité conséquente de telles données: elles ne sont publiées qu'irrégulièrement et très dispersées dans les nombreuses équipes de recherche travaillant sur le sujet. Jusqu'à ces dernières années, cela ne posait pas un problème crucial, car l'utilisation de ces données pour l'ajustement des modèles dynamiques se heurtait à la puissance des ordinateurs qui ne pouvait prendre en compte qu'un nombre limité de données. Ce n'est plus le cas aujourd'hui, et l'utilisation d'un maximum de données est désormais nécessaire pour l'obtention des meilleurs modèles dynamiques possibles.

Quelles données pour cette base de données ?

Notre but est de rassembler principalement des données astrométriques, mesures de positions directes ou indirectes. Précisons la nature de ces données.

a) Qu'est-ce qu'une observation astrométrique?

Une observation astrométrique est une donnée qui permet d'avoir une information -directe ou indirecte- sur la position d'un astre sur la sphère céleste ou dans l'espace dans un repère standard permettant le rattachement d'observations différentes, entre elles. Il est à noter que chaque observation doit être datée dans l'échelle de Temps Universel (avec une précision à définir), toujours dans le but du rattachement des observations entre elles, ce qui est fondamental. Une observation de position peut revêtir deux aspects différents: observation directe (deux objets sont mesurés à X secondes de degré l'un de l'autre à une heure bien définie en UTC) ou observation indirecte d'un phénomène (tel satellite disparaît dans l'ombre de la planète à telle heure bien définie en UTC, ce qui correspond à une position bien particulière). La figure n°1 montre toutes les possibilités de ces observations.

b) Les mesures directes de positions

Les mesures de positions qui sont publiées et analysées régulièrement peuvent être relatives à une référence proche (qui peut d'ailleurs être l'un des objets observés lui-même) ou absolues, données dans un système de référence conventionnel. On se trouvera alors dans le cas d'un catalogue d'étoiles ou de positions d'astéroïdes, si ce n'est que, dans le cas d'une mesure isolée une erreur supplémentaire est introduite par l'incertitude sur la position de la planète -calculée si elle n'a pas été observée-. Notons que inversement, l'éphéméride du satellite par rapport à la planète fournit une position observée de la planète

elle-même, avec souvent une meilleure précision qu'une observation directe de celle-ci. Les plaques photographiques à grand champ (par exemple celles issues des télescopes de Schmidt) fournissent des positions absolues, alors que les observations CCD ne donnent que des positions relatives ; les positions sont données dans un repère orienté selon un système de référence standard sauf s'il ne s'agit que de la donnée d'une distance mutuelle.

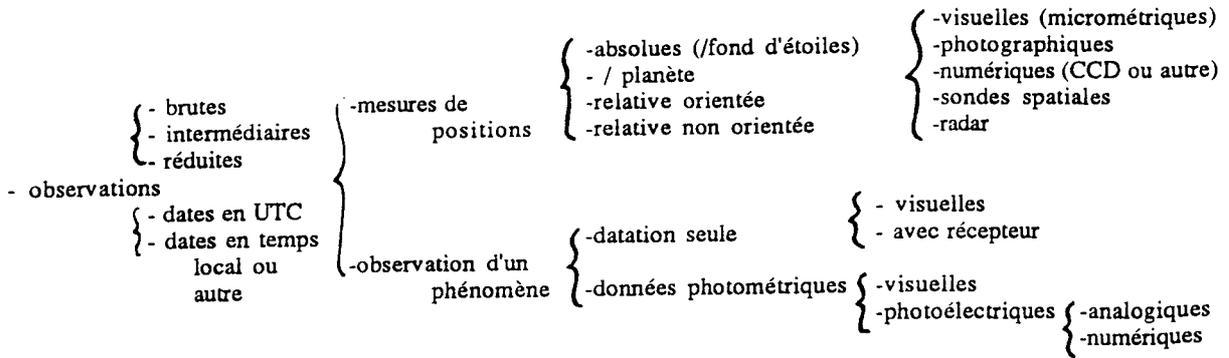


Figure n°1

c) Les phénomènes

Certains satellites se prêtent à l'observation de phénomènes d'occultations ou d'éclipses mutuelles ou avec leur planète-mère (satellites galiléens de Jupiter, gros satellites de Saturne, satellite de Pluton). Ces observations, lorsqu'elles sont datées convenablement en UTC (Temps Universel Coordonné) ont un grand intérêt astrométrique. La datation et la mesure photométrique de chute en magnitude fournissent l'équivalent d'une position parfois plus précise qu'une mesure directe (figure n°2).

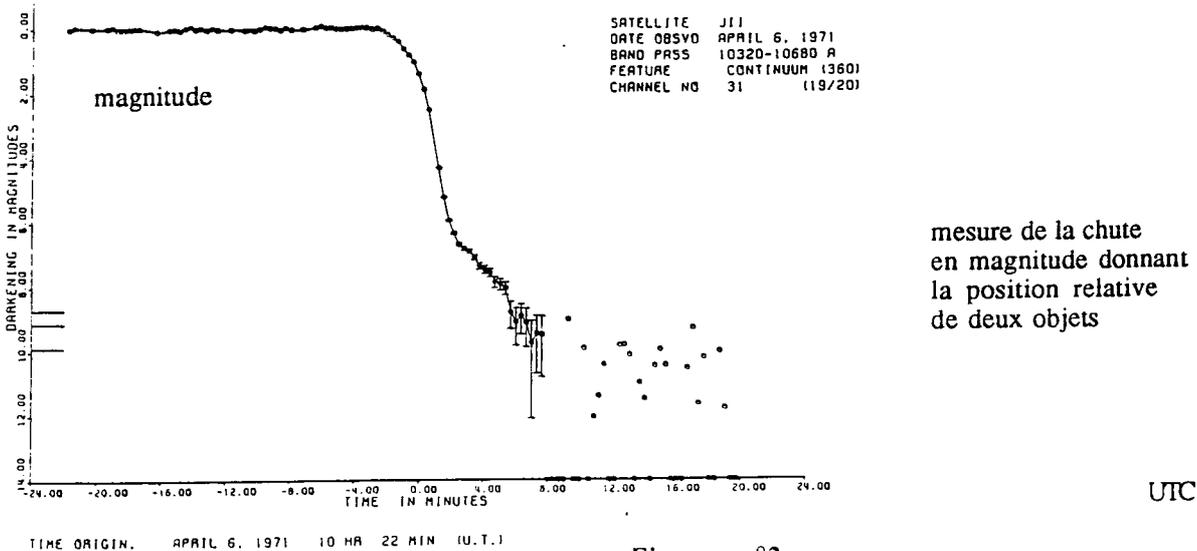


Figure n°2

Exemple de courbe de lumière photométrique obtenue lors de l'observation d'une éclipse d'un satellite galiléen par Jupiter : la datation de chaque point en UTC (Temps Universel Coordonné) est essentielle.

d) Les données spatiales

Si le guidage des sondes spatiales a nécessité des séries importantes d'observations astrométriques pour disposer d'une théorie du mouvement de qualité, ces sondes spatiales ont ensuite effectué des observations : on peut tirer des informations astrométriques de ces données, souvent de grande valeur. Ces données ont bien entendu leur place dans une base de données astrométriques mais elles sont souvent déduites d'observations effectuées dans des repères inhabituels et posent des problèmes de réduction particuliers. L'incorporation des données spatiales parmi d'autres données pour un ajustement ultérieur est plutôt empirique: on leur affecte un très grand poids malgré leur petit nombre.

e) Les données anciennes

Dans le cas des données anciennes, il n'est pas possible d'imposer un système de référence. On peut seulement essayer de retrouver ce que l'auteur a voulu faire. Ces données peuvent aussi avoir été re-réduites

et re-publiées par des auteurs modernes voulant ajuster une théorie. C'est eux qui pourront tenter de rapprocher ces données des standards conventionnels. Cela pose de nombreux problèmes. Citons par exemple les observations visuelles de micromètres ou d'héliomètres (mesures successives de distances angulaires et d'angies de position) ceal reviendrait à mesurer les ascensions droites et les déclinaisons d'un objet à des **instants différents**.

D'autre part, il est à noter que tous les satellites naturels du système solaire sont concernés, même si ce n'est pas avec la même priorité. Ainsi, on peut distinguer deux catégories d'objets:

- les satellites aisément observables dont on dispose déjà de nombreuses observations et dont le mouvement est bien connu. La qualité des observations à stocker est ici essentielle.

- les satellites faibles difficiles à observer dont le mouvement n'est connu qu'avec une faible précision. Il faudra là rassembler un maximum de données et le Centre de données pourra, par les bilans de ce qui est disponible, montrer aux observateurs les besoins les plus importants afin de rééquilibrer les données disponibles.

La précision des données - Ephémérides

L'évaluation de la précision des données proviendra de la détermination de la différence entre valeur observée et valeur calculée à partir des éphémérides (O-C) ou résidu. La valeur calculée nécessite l'existence d'une éphéméride mais on n'aura pas la même précision selon le satellite considéré. Ainsi, pour un objet peu étudié et peu observé, un résidu d'une seconde de degré sera acceptable. Ce ne sera pas le cas pour d'autres corps pour lesquels un résidu d'une seconde de degré montrera la très mauvaise qualité de l'observation. Il n'entrera pas dans le rôle du centre de données de rejeter telle ou telle observation mais de publier un résidu donnant une indication sur la précision. Seules les erreurs d'identification des satellites (courantes) seront corrigées. Dans le cas des positions absolues d'un satellite, il faudra garder en mémoire que le résidu intègre également celui sur la position calculée de la planète elle-même.

C'est bien sûr à partir des observations réduites que l'on aura les (O-C). Il importe donc de documenter parfaitement les réductions effectuées. Les (O-C) permettront alors d'obtenir un écart-type par série (ce ne sera qu'une indication car les écarts-type ne sont pas toujours comparables: comment définir des "séries d'observations" équivalentes?). Notons que certaines observations sont fournies sous forme de "points moyens". L'écart-type de ces séries devra être corrigé en conséquence pour obtenir une certaine homogénéité entre les séries de données.

La donnée d'un résidu avec chaque observation, pourvu que la théorie utilisée soit bien documentée permettra donc d'apprécier immédiatement la précision d'une observation ou d'une série d'observations, au moins par rapport aux autres. Il sera important de préciser si l'éphéméride utilisée provient ou non d'une théorie ajustée sur ces observations. La donnée de plusieurs résidus venant de théories différentes pourrait éventuellement être intéressante. N'oublions pas qu'ici, le résidu doit servir à rendre compte de la précision des observations et non de la qualité de la théorie: attention donc aux observations publiées sous forme de "points moyens" (en général, observations anciennes).

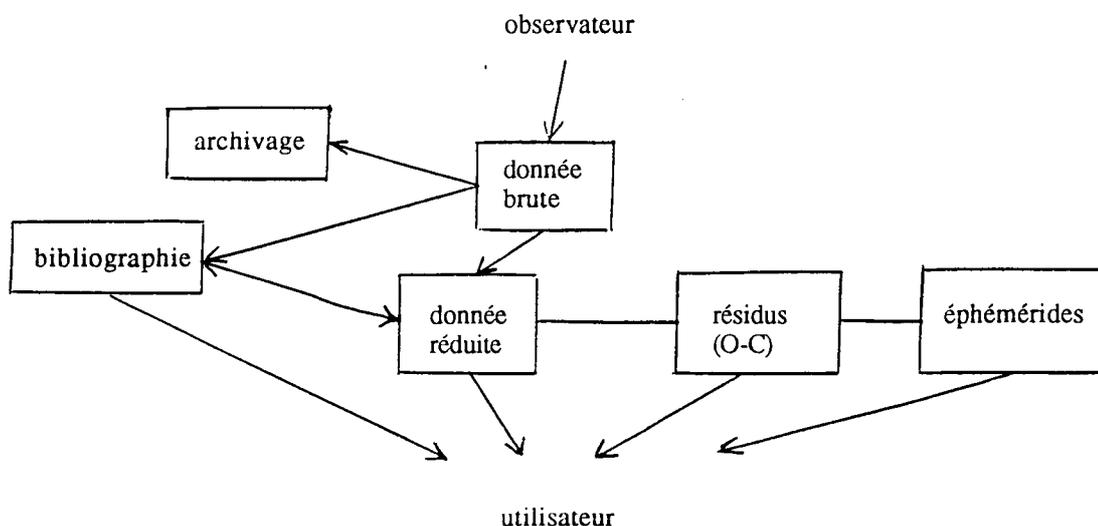


Figure n°3
Organigramme de fonctionnement du Centre de Données

D'autre part, la fourniture d'une position calculée (par réseau électronique ou autre moyen) pourrait être utile. Bien que les éphémérides de satellites soient largement répandues, chaque équipe d'observateurs est en général spécialisée sur certains objets et ne dispose pas toujours de tous les éphémérides de tous les satellites. Cela éviterait la publication d'observations sans intérêt ou du moins de "rectifier le tir" si la technique d'observation ne s'avère pas bonne au vu des résidus.

La figure n°3 montre une ébauche d'organigramme de fonctionnement du Centre de Données.

Fonctionnement du centre de données - Autres centres

Le Centre de Données a pour but de fournir les données d'observations aux demandeurs (par exemple via un réseau informatique) mais aussi de faire circuler l'information dans tous les instituts et observatoires intéressés. Des circulaires régulières sont nécessaires. Il faut insister sur le fait que tous les établissements ne sont pas reliés à des réseaux informatiques. L'accessibilité doit toujours être possible via le support papier.

Afin de garantir l'accessibilité aux données, le Centre fonctionnera sous l'autorité de l'UAI, c'est à dire du Working Group "Satellites" de la Commission 20. A ce jour, les instituts qui ont manifesté leur intérêt à la création de ce centre sont outre le Bureau des Longitudes, France (J.-E. Arlot, W. Thuillot), le National Astronomical Observatory, Japon (T. Nakamura), l'U.S.N.O. Washington D.C., U.S.A. (D. Pascu, P.K. Seidelman), le Royal Greenwich Observatory, Grande-Bretagne (D. B. Taylor), l'Observatorio Nacional, Rio de Janeiro, Brésil (R. Viera-Martins), l'Observatoire de Bordeaux, France (M. Rapaport), le Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, USA (R.A. Jacobson) et l'Institut d'Astronomie Théorique de Leningrad, URSS (V. Shor).

Une liaison devra également être réalisée avec les autres centres de données astronomiques existants: parmi les très nombreux centres de données, on peut d'ailleurs en distinguer deux plus particulièrement, du fait des relations qui peuvent se nouer avec le Centre de Données sur les Satellites Naturels.

a) Le CDS (Centre de données stellaires)

Le CDS installé à Strasbourg, distribue par l'intermédiaire de divers moyens (réseaux, ...) des informations sur les étoiles. Ces informations proviennent de multiples catalogues existants. La base de données gérée par le CDS est dénommée SIMBAD. Ce centre exclut a priori les objets du système solaire, mais sa position de centre de données international situé sur le territoire français et subventionné par l'INSU le désigne comme partenaire privilégié.

b) Le "Minor Planet Data Center"

Ce centre de données installé à Cambridge, Massachussets, USA, est supervisé par l'UAI à travers la Commission 20. Toutes les observations d'astéroïdes et de comètes y sont reçues. Les nouveaux objets reçoivent un numéro lorsque l'orbite est déterminée. Un travail de détermination d'orbites est donc mené. On peut interroger le Centre à distance par réseau électronique, demander des données sur bande ou recevoir les "Minor Planet Circulars". Le Centre fournit donc des données observationnelles et aussi des éphémérides d'astéroïdes et de comètes. Des catalogues ("Cometary orbits", "Orbits of Unnumbered Minor Planets", "Discoveries and identifications of Minor Planets") sont mis à jour et régulièrement publiés. Des informations sur la magnitude des objets sont également fournis.

Le Minor Planet Data Center est le seul centre de données concernant des objets du système solaire: seuls les astéroïdes et les comètes sont concernés. C'est ce qui fait que le besoin d'un centre de données similaire sur les satellites naturels des planètes s'est fait sentir. Des relations devront s'établir inévitablement avec le Minor Planet Data Center du fait de la similarité des pôles d'intérêt concernant des objets du système solaire.

Extension du rôle du centre de données vers la planétologie

L'interaction des données astrométriques et des données planétologiques peut entraîner la nécessité d'adjoindre aux données purement astrométriques distribuées par le Centre, des informations sur des travaux s'intéressant à la physique des satellites naturels. En effet, ces travaux peuvent présenter un intérêt certain, pour l'amélioration des réductions, pour l'interprétation de certaines observations ou pour la recherche et l'étude d'effets non gravitationnels. Dans le cas des études planétologiques, le Centre de Données ne donnerait que des informations bibliographiques. Notons que les travaux théoriques sur la dynamique des satellites naturels devraient bien entendu être également intégré à ces données bibliographiques.

Conclusion

L'Assemblée Générale de l'UAI tenue en 1991 à Buenos Aires a accepté que le Bureau des Longitudes se charge de la mise en route et de la gestion de ce centre de données. Outre l'intérêt, pour l'établissement, d'héberger un Centre de données international, les informations qui y seront rassemblées seront utiles aux travaux de recherche menés au Bureau des Longitudes même et aussi dans plusieurs laboratoires français (Université de Lille, Observatoire de Bordeaux, CERGA) où des travaux théoriques sur les systèmes de satellites sont en cours.

Depuis janvier 1992, la mise en place du Centre débute. N. Baron est affectée à mi-temps à ce travail qui fait suite au travail préliminaire réalisé par Y. Jannot il y a plusieurs années. L'hébergement informatique du Centre, actuellement réalisé sur le VAX de l'IAP, se fera en harmonie avec les choix de moyens de calcul et de réseaux de l'établissement avec la collaboration de P. Sizaire.

Un document plus élaboré que le présent compte-rendu existe et est à la disposition des personnes intéressées.

LA DIFFUSION INFORMATISÉE DES ÉPHÉMÉRIDES

P. Rocher

Introduction

La diffusion informatisée des éphémérides doit répondre à plusieurs critères. Ces critères portent sur des choix matériels tels que le type d'ordinateur, les supports d'information, les types de liaisons informatiques. Ils portent également sur les différents types d'utilisateurs susceptibles de se servir de ces éphémérides. Nous allons passer en revue les différents choix qui existent actuellement.

Les différents types d'utilisateurs

On peut classer les utilisateurs en quatre catégories. Premièrement le grand public, dont les connaissances en astronomie sont, en général, limitées, ensuite les astronomes amateurs, puis les professionnels utilisateurs d'éphémérides mais par forcément des astronomes, et enfin, les professionnels spécialistes de l'astronomie fondamentale. Les éphémérides, ainsi que leur précision sont fonction du type d'utilisateurs à qui elles sont destinées.

Le matériel informatique

On peut distinguer trois types de matériel informatique, le premier, qui n'est en général qu'à la disposition des professionnels, est constitué par les gros ordinateurs et les stations de travail, le deuxième, qui tend à se répandre de plus en plus dans les médias, est constitué par les micro-ordinateurs, et le dernier, très spécifique à la France, est le Minitel.

Les supports d'information

Les supports d'information sont fonction du matériel informatique utilisé. Pour les gros ordinateurs et les stations de travail, le support d'information est, soit la bande magnétique pour les gros volumes de données, soit l'utilisation de réseaux commutés pour les transferts de fichiers et les calculs à distance. Pour les micro-ordinateurs le support le plus classique est la disquette et, depuis peu, le disque CD ROM. Le Minitel, lui, se contente d'une simple liaison téléphonique. L'utilisation des éphémérides nécessite la diffusion d'une documentation ou d'un mode d'emploi. Dans le cas des gros ordinateurs, ces documents sont souvent sous forme écrite, soit sur papier, soit sur fichier informatique, mais ils doivent apparaître sous la forme d'aide en ligne pour les logiciels sur micro-ordinateur et pour le Minitel.

Mode de rétribution

La diffusion des éphémérides et leur rétribution peuvent se faire de différentes manières, le mode de rétribution est lié au support d'information : abonnement sur les réseaux commutés, redevance PTT pour le Minitel, achat chez des distributeurs spécialisés pour les logiciels sur micro-ordinateurs et éventuellement envoi gratuit du producteur.

Produits existants

1. Le Serveur Minitel 3616 BDL

Ce serveur, en fonction depuis le printemps 1991, diffuse des renseignements astronomiques à l'usage du grand public. Cette diffusion informatisée présente l'avantage d'être accessible à tous et à tous moments. Elle a remplacé, en partie, une diffusion écrite qui correspondait à des demandes de renseignements. Le matériel informatique utilisé se compose, pour la mise au point des programmes d'un micro-ordinateur IBM PS, et d'un serveur installé au CIRCE.

2. Autres serveurs et réseaux

Accessibles sur les terminaux d'ordinateurs par l'intermédiaire des réseaux commutés, ces serveurs sont destinés aux professionnels. Les réseaux commutés, outre la messagerie électronique et le transfert des fichiers, permettent d'avoir accès à différents serveurs et cela par l'intermédiaire de mots de passe. Ces réseaux qui sont souvent interconnectés à l'échelle mondiale, permettent une diffusion rapide de l'information. Un certain nombre de services sont disponibles en astronomie, par exemple le Centre des Données Stellaires (CDS) diffuse des renseignements sur les étoiles via la base de données SIMBAD. De même le *Minor Planet Center* diffuse les *Minor Planet Circulars/Minor Planets and Comets*, ainsi que les télégrammes de l'Union Astronomique Internationale à l'aide d'un serveur installé au *Smithsonian Astrophysical Observatory* de Cambridge.

3. Diffusion d'éphémérides sous forme de bandes magnétiques

Le *Jet Propulsion Laboratory* diffuse les résultats de ces intégrations numériques (DE102, DE200 . . .) sur des bandes magnétiques. De même le Bureau des Longitudes diffuse ses éphémérides, sous la forme de séries polynômes de Tchebycheff, accompagnées de programmes de calcul (Programme EPHAUT réalisé par G. Francou).

4. Programmes d'éphémérides sur micro-ordinateurs

Différents services d'éphémérides ont, ou sont sur le point de diffuser leurs éphémérides sous la forme de disquettes et de logiciels pour micro-ordinateurs. Des catalogues d'étoiles sont également disponibles sur CD ROM.

Voici une liste non exhaustive de ce qui existe actuellement :

US Naval Observatory (USNO)

- ICE (Interactive Computer Ephemeris) : éphémérides de la Lune, du Soleil et des planètes du système solaire sur une période de 250 ans, programme très complet mais peu convivial. Version IBMPC (1989).
- SA (Satellite Almanac) : éphémérides des satellites des planètes du système solaire sur une période de 12 ans, programme très complet mais peu convivial. Version IBMPC (1989).
- MICA (Multiyear Interactive Computer Almanac) : éphémérides de la Lune, du Soleil et des planètes du système solaire sur une période de 10 ans, programme très complet et convivial. Versions Apple et IBMPC. (pas encore commercialisées).

Institut d'Astronomie Théorique de St-Petersbourg (ITA)

- STAMP : programme de gestion de la base de données des éléments osculateurs des astéroïdes. Une version par an (tous les 400 jours), possibilités de tri à l'aide de nombreux critères. Version IBMPC (1992).
- CERES : programme de calcul des éphémérides des astéroïdes, de tracé de trajectoires sur fond d'étoiles, de calcul d'occultations d'étoiles par les astéroïdes. Version IBMPC (1991).
- EFRAT : programme de calcul des éphémérides de la Lune, du Soleil, des planètes du système solaire et des satellites galiléens de Jupiter (1991).

Bureau des Longitudes (BDL)

- SATELLITES : programme annuel de calcul des éphémérides des satellites, vendu par les Éditions de Physique avec le Supplément à la CDT.
- VESTA : programme d'intégration numérique de la trajectoire d'une sonde dans le système solaire (sur la période 1987-2010), avec calcul et ajustement d'un survol de Mars. Programme réalisé pour le CNES (1989).
- TOPO : programme de calcul des positions topocentriques apparentes de la Lune, du Soleil, des planètes du système solaire et des étoiles, valable sur la période 1987-2010. Programme réalisé pour l'IPG (1991).
- INTEGR : programme d'intégration numérique d'astéroïdes.
- PLANETE : programme de calcul des éphémérides de la Lune, du Soleil, des planètes du système solaire et des astéroïdes sur la période 1987-2010.

5. Problèmes spécifiques liés aux micro-ordinateurs IBM PC

On peut distinguer deux types de problèmes, les uns sont liés aux matériels, les autres sont liés aux logiciels. Les problèmes liés aux matériels sont les suivants :

- Plusieurs types d'écran (plasma, cristaux liquides, écran classique monochrome, écran classique couleur).
- Plusieurs modes graphiques pas toujours compatibles (CGA, Hercule, EGA, VGA, SVGA) qui utilisent des cartes graphiques de normes différentes.
- Très grand nombre d'imprimantes et de pilotes d'imprimantes.
- Plusieurs pilotes de souris.
- Présence ou non du coprocesseur mathématique.
- Taille mémoire limitée à 640K pour les programmes.
- Plusieurs types d'environnement DOS, OS2, WINDOWS qui peuvent être de versions différentes.

Les problèmes liés aux logiciels sont les suivants :

- Gestion des menus déroulants.
- Gestion et contrôle des saisies.
- Aide en ligne.
- Contrôle des sorties et des sauvegardes.
- Installation automatique des programmes et des fichiers.
- Documentation écrite.

Une grande partie de ces problèmes est résolue en utilisant un gestionnaire d'écrans et de saisie (Hight Screen 5.5 de PCSoft), mais la constante évolution des matériels et des logiciels rend très délicate la réalisation de tels programmes et nécessite une maintenance des produits.

Prospective

Nous projetons de modifier le programme PLANETE afin d'obtenir un produit équivalent à MICA ou à EFRAT. Les modifications nécessaires portent plus sur l'environnement du programme et sur la création d'aides en ligne que sur son contenu.

ANNEXE

QUELQUES PETITS "TRUCS" A SAVOIR POUR UNE MEILLEURE UTILISATION DU VAX ET SURTOUT UN SUPER CONFORT POUR LES UTILISATEURS

Nicole Baron

La perte de mémoire, l'impatience, la paresse, le désir d'une édition dans un fauteuil, la programmation en sécurité, la prudence..sont les grands traits de caractère de tout utilisateur d'ordinateur et le VAX et son système nous le permettent.

PERTE DE MEMOIRE.... La commande **SEARCH** est une alliée précieuse pour savoir comment se fait l'appel du sous-programme **EPHER.....**

SEARCH [...]*.for Epher /out=imprimante

Cela signifie donc une recherche dans toute l'arborescence [...] et dans tous les programmes écrits en FORTRAN (*.FOR) de la chaîne de caractères **EPHER** avec une redirection de la sortie sur une imprimante et le résultat sera imprimé ainsi:

```
*****
$1$DUA0:[USERBDL.TOTO.SOLEIL]BIDULE.FOR;1
      call epher(t,icor,icen,iv,tjf,v,ierr)

*****
$1$DUA0:[USERBDL.TOTO.EPHEMERIDE]EPHAUT.FOR;3
      subroutine epher (tjj,icorps,icent,ipva,tjf,r,ierr)
c      appels sp : epher1 epher2 epher3.
1      call epher1 (tjj,icorps,icent,ipva,tjf,r,ierr)
2      call epher2 (tjj,icorps,icent,ipva,tjf,r,ierr)
3      call epher3 (tjj,icorps,icent,ipva,tjf,r,ierr)

*****
$1$DUA0:[USERBDL.TOTO.LUNE]LUNATIC.FOR;5
      subroutine epher (t,icor,icen,ipva,tjf,r,ierr)

*****
```

Ainsi TOTO a retrouvé dans les "directory" SOLEIL, EPHEMERIDE et LUNE et dans les programmes BIDULE, EPHAUT et LUNATIC, les renseignements nécessaires.

IMPATIENCE.... Lorsque l'on lance un programme en interactif en appuyant sur les touches CTRL et T, il apparaît à l'écran:

```
bdl>run fino
BDLMCA::_TTA2: 10:35:15 FINO   CPU=00:00:46.94 PF=8561 IO=3465 MEM=309
BDLMCA::_TTA2: 10:35:18 FINO   CPU=00:00:47.45 PF=8937 IO=3491 MEM=671
BDLMCA::_TTA2: 10:35:21 FINO   CPU=00:00:48.38 PF=9712 IO=3539 MEM=1440
FORTRAN STOP
bdl>
```

Le programme **FINO** est inscrit ici comme actif et maintenant, après **STOP**, on a:

```
BDLMCA::_TTA2: 10:35:53 (DCL) CPU=00:00:50.14 PF=9987 IO=3567 MEM=223
BDLMCA::_TTA2: 10:35:54 (DCL) CPU=00:00:50.17 PF=9987 IO=3568 MEM=223
BDLMCA::_TTA2: 10:36:06 (DCL) CPU=00:00:50.22 PF=9987 IO=3570 MEM=223
bdl>
```


EDITION DANS UN FAUTEUIL.....

CHANGEMENT DE GRANDEUR DE LA FENETRE

Command: SET SCREEN 120, met la largeur de la fenêtre à 120, donne donc des caractères plus petits;

JUSTIFICATION D'UN TEXTE

Command: SET WRAP 75, donne une marge droite à 75 caractères du début de la ligne et PF1 et 8, formate le texte selon la marge choisie;

MINUSCULES-MAJUSCULES

La combinaison de touches PF1 et 1 du clavier numérique transforme en minuscules des majuscules et inversement.

INTRODUCTION DE CARACTERES SPECIAUX : ASCII

PF1, permet de taper sur la ligne de commande le code ASCII du caractère choisi, PF1 et 3, insère ce caractère dans le texte.

QUELQUES AUTRES COMMANDES OU COMBINAISON DE TOUCHES CONFORTABLES

PF1 ET 2, efface du curseur à la fin de la ligne sans effacer le <CR><LF>;
7, déplace le curseur d'une page dans le sens choisi par les touches 4 ou 5, si les pages sont marquées dans le texte par <FF>;

CTRL et L , donne une fin de page de code ASCII 12 ;
Command: TYPE, donne le numéro de la ligne sur laquelle se trouve le curseur;
Command: TYPE 22, donne la ligne 22 sous la ligne de commande et positionne le curseur dans le texte à cette ligne;
Command: COPY 1 TO 33, recopie la ligne 1 à la ligne 33;
Command: PRINT TEXTE_IMP.DAT, crée un fichier d'impression avec numérotation de lignes et paginé du texte sur lequel on travaille ou du texte tronqué si on le désire;
Command: WRITE NEW_TEXTE.DAT, crée un nouveau fichier avec tout ou partie du texte (tronqué du buffer PASTE par exemple);
Command: CLEAR PASTE, réinitialise le buffer PASTE;
Command: CLEAR MAIN, efface le fichier de travail,
Command: QUIT/SAVE, permet de sauvegarder le fichier , donc avec les modifications qui ne se trouvent pas dans la version précédente.

bdl> EDT TEXTE_GENIAL.DAT/RECOVER, permet de récupérer le fichier (.JOU) sauvegardé par QUIT/SAV

Command: INCLUDE [-SOLEIL]REPERE.FOR =BUF1
Command: CHANGE BUF MAIN Ces 2 commandes incluent la partie du prg. REPERE.FOR qui est dans BUF1, ds le fichier en cours,

PROGRAMMATION SECURITE..... Le DEBUG est très utile dans la mise au point de programme; les règles sont très simples; en voici quelques-unes:

La mise en oeuvre se fait de la façon suivante à la compilation,

```
bdl> FOR CHOUETTE/DEBUG/NOOPT   ou      bdl> CC GENIE/DEBUG/NOOPT
bdl> LIN CHOUETTE/DEBUG          ou      bdl> LIN GENIE/DEBUG
bdl> assi obsbrut infile
bdl> R CHOUETTE                  ou      bdl> R GENIE
```

VAX DEBUG Version 5.4.1

DGB> SET MODE SCREEN ou tapez sur PF3

--SRC: MODULE CHOUETTE\$MAIN - scroll - source -----

```
20: open (2,file='infile',readonly,status='old',form='unformatted')
21: open (3,file='obsaffine',status='new',form='unformatted',
22:      recordsize=64*11)
23:
24: read(2)omega,nu,npp,nrgc,polelo,polela,orig,nbpp,nbt4,nsat,nbfr
----> 25: do k=1,64,4
26:      read(2)((t(j,i),j=1,128),i=k,k+3)
27: enddo
28: do k=1,64,4
29:      read(2)((absc(j,i),j=1,128),i=k,k+3)
30: enddo
```

--OUT - output -----

break at CHOUETTE\$MAIN\%LINE 25

```
25: do k=1,64,4
CHOUETTE$MAIN\OMEGA
(1):      1.78843880000000
(2):      1.78843880000000
.
(19):     2.36748676600000
```

CHOUETTE\$MAIN\NPP(2): 1

CHOUETTE\$MAIN\NPP(3): 6

stepped to CHOUETTE\$MAIN\%line 26

```
26:      read(2)((t(j,i),j=1,128),i=k,k+3)
```

-- PROMPT - error - program - prompt -----

```
DBG> set bre %line 25      ou encore      DBG> ex npp(3)
DBG> go                    DBG> examine
DBG> ex omega              DBG> step
DBG> ex npp(2)             DBG> quit
```

On peut se servir de l'EXE fait avec le DEBUG qui sera alors exécuté sans optimiseur:

```
bdl> R/NODEBUG CHOUETTE
```

Voici quelques autres commandes sous DEBUG avec de nouvelles définitions de touches.

2	fait avancer les instructions du programme dans la fenêtre du haut,
8	a l'effet inverse,
0	exécute l'instruction sur laquelle est positionnée la flèche,
1	examine la dernière variable indexée vérifiée en avançant l'index de 1
4	décale la fenêtre OUT d'une colonne vers la gauche, (fois X),
6	décale la fenêtre OUT d'une colonne vers la droite, (fois X, comme la 4)
,	exécute les instructions jusqu'à un arrêt, break, préinstallé par exemple, le programme s'exécute jusqu'à 25 programme un arrêt en 25
DBG> GO	programme un arrêt en 25 la 49eme
DBG> SET BRE %LINE 25	que cette instruction se déroule,
DBG> SET BRE/AFTER=49 %LINE 25	arrêt temporaire sur le ss-programme
fois	SOUSTRACTION,
DBG> SET BRE/TEMP SOUSTRACTION	permet de dérouler le sous-programme
	ADDITION,
DBG> SET SCOPE ADDITION	retour au MAIN après un scope dans la
DBG> SET SCOPE CHOUETTE\$MAIN	subroutine ADDITION,
DBG> SET TRACE %LINE 22	permet de vérifier que le programme
DBG> SET TRACE/AFTER=300 %line 22	passé sur l'instruction 22,
DBG> SET WATCH I	vérifie que la 300e fois le programme
DBG> SET BRE ADDITION WHEN(I=5)	déroule l'instruction 22,
	surveille la variable I en l'affichant à
DBG> EVALUATE I+12	chaque changement de valeur,
DBG> DEPOSIT i=20	arrêt conditionnel (si i=5) dans le ss-
	programme ADDITION ,
DBG> EXAMINE/HEX I	calcule I+12,
DBG> STEP	permet de changer la valeur d'une
DBG> STEP 4	variable en cours de programme,
DBG> CANCEL BRE/ALL	donne la valeur hexadécimale de I
DBG> CANCEL BRE %LINE 25	exécute 1 ligne de programme,
DBG> SHOW MODULES	exécute 4 lignes de programme,
DBG> SHOW SYMBOL/TYPE I	enlève tous les points d'arrêt,
DBG> SHOW BREAK	supprime l'arrêt sur la ligne 25,
DBG> QUIT ou EXIT	donne tous les modules du programme
	examine le type de i,
	donne tous les points d'arrêt
	pour sortir du DEBUG.

-- PRUDENCE.....Quelques conseils pour un bon BACKUP facile à "DEBACKUPPER" .
Ici,nous voulons faire le BACKUP de tous les fichiers de TOTO.

bdl> SET DEF poubelle:[toto] équivaut à se mettre dans la poubelle de TOTO

\$> BACKUP/EXCLUDE=(*.OBJ,*.EXE,[userbdl.TOTO.bricol]*.*/RECORD -
- DUA0:[userbdl.toto...] batotal_toto.bck/SAVE_SET/LIST=listeba_toto.dat

Cette commande sauvegarde dans un fichier BATOTAL_TOTO.BCK tous les fichiers de tous les DIRECTORY de TOTO en éliminant les fichiers .EXE, .OBJ et tout le DIRECTORY BRICOL de TOTO; une liste de ces fichiers est donnée dans le fichier listeba_toto.dat.

Si l'on veut récupérer tous ces fichiers à l'endroit disque où ils se trouvaient, écrire cette commande:

\$> BACKUP BATOTAL_TOTO.BCK/SAVE_SET dua0:[000000...]

Si l'on ne veut récupérer qu'une partie de l'arborescence, on écrira:

\$> BACKUP BATOTAL_TOTO.BCK/SAVE_SET/SELECT=(trace.for,essai.dat) -
- dua0:[userbdl.toto.ephemeride]*

Voici comment sort la liste (tronquée ici) d'un BACKUP en EDT:

Listing of save set(s)

```
Save_set:                BATOTAL_TOTO.BCK
Written by:              TOTO
Date:                   12-FEB-1992 14:03:33.63
Command: BACKUP/EXCLUDE=(*.OBJ,*.EXE, [userbdl.TOTO.bricol]*.*/RECORD --
-DUA0:[userbdl.toto...] BATOTAL_TOTO.BCK /SAVE_SET -/LIST=listeba_toto.dat
Node name:              _BDLMCA::
Written on:              _$1$DRA2:
[USERBDL.TOTO.EPHEMERIDE]essai.dat;1          4136 5-SEP-1990 15:53
[USERBDL.TOTO.ETOILE]etoile.for;51           6 15-DEC-1989 16:05
.[USERBDL.TOTO.SOLEIL]soleil.for;15          4 25-JAN-1988 8:53
Total de 3 files, 4148 blocks
End of save set
```

ET DANS TOUS LES CAS, NE JAMAIS OUBLIER LA COMMANDE HELP, QUE L'ON SOIT SOUS COMMANDE DCL, SOUS EDITEUR OU SOUS DEBUG