

---

*NOTES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES  
DU BUREAU DES LONGITUDES*

---

S029

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

**- 1990 -**

---

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

Février 1990



## LES JOURNÉES 1990

Les *journées scientifiques 1990 du service des calculs et de mécanique céleste du Bureau des Longitudes* se sont déroulées du 13 au 15 février 1990. Les deux premières journées ont été consacrées à la présentation de travaux scientifiques. Elles ont été suivies par une demi-journée de synthèse et de prospective.

Ces *journées* sont une nouveauté dans les activités scientifiques de l'établissement. Elles constituent un forum interne au service plutôt qu'un colloque rigoureusement encadré. Riches en discussions et en interrogations, elles sont ouvertes aux chercheurs et aux techniciens du service; en outre, les membres extérieurs du Conseil Scientifique participent aux discussions.

La vocation de ces *journées* est multiple:

- Permettre une réflexion d'ensemble sur les orientations scientifiques de l'établissement;
- Faciliter l'échange d'informations scientifiques entre les équipes, et les contacts entre chercheurs et techniciens;
- Apporter une aide aux jeunes chercheurs;
- Constituer une ébauche servant à la rédaction du rapport d'activité du service.

Les *actes des journées 1990* figurent dans ce document. C'est un jalon dans la vie scientifique de l'établissement qui ne prétend ni à l'exhaustivité ni à la perfection. Cependant la majorité des travaux individuels ou collectifs sont rassemblés sous ce titre qui couvre la plus grande partie des activités du service: mécanique céleste théorique, évolution du système solaire, théories des mouvements des planètes et de la lune, satellites naturels (théories et observations), astéroïdes et comètes, HIPPARCOS, les publications, les éphémérides et le projet "MINITEL". On notera toutefois l'absence des activités se rapportant au chronométrage des pulsars, à l'IERS et à l'astrométrie VLBI; L. Fairhead et J.-F. Lestrade n'ont pas participé aux *journées*.

Ce premier forum s'est déroulé avec la participation de la très grande majorité du personnel du service. Sa réussite est de bonne augure pour l'avenir et encourage le service à renouveler cette expérience.

A bientôt...

J. Chapront

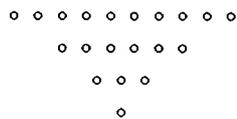


**JOURNÉES SCIENTIFIQUES DU SERVICE DES CALCULS ET DE MÉCANIQUE  
CÉLESTE DU BUREAU DES LONGITUDES**

---

STELLMACHER Irène • Solutions périodiques en mécanique céleste.	1
EDELMAN Colette • Régularisation, solutions périodiques, captures.	2
LASKAR Jacques • Evolution à long terme et mouvement chaotique du Système Solaire. • Développement du manipulateur algébrique TRIP.	4 6
JOUTEL Frédéric • Problèmes numériques dans les théories des théories semi-numériques planétaires.	7
BRETAGNON Pierre • Théories planétaires générales.	11
SIMON Jean-Louis • Théories planétaires à variations séculaires en fonction d'un seul argument angulaire.	15
SAGNIER Jean-Louis • Dynamique des astéroïdes.	19
BARON Nicole • Intégrateur numérique d'une sonde à travers le système solaire.	22
ROCHER Patrick • Trajectographie planétaire.	26
BORSENBURGER Annick • Observations des petites planètes par HIPPARCOS.	30
MORANDO Bruno • Réduction des observations des petites planètes par HIPPARCOS.	36
ROCHER Patrick et THUILLOT William • Prédiction des occultations d'étoiles par les astéroïdes.	39
FRANCOU Gérard • Ephémérides et informatique.	43

CHAPRONT-TOUZE Michelle	
• Mouvement orbital des satellites de Mars et libration de Phobos.	4 6
LE GUYADER Claude	
• Ephémérides des satellites de Neptune, Triton et Néréïde.	4 9
VU Duong Tuyen et THUILLOT William	
• Théorie des satellites galiléens de Jupiter: Libration et solution variationnelle.	5 2
ARLOT Jean-Eudes.	
• Campagne d'observations "PHEMU".	5 6
• Observations et réductions "AVIA".	5 7
RUATTI Christian	
• Dépouillement des résultats de la campagne d'observation des phénomènes mutuels des satellites galiléens de Jupiter.	5 9
THUILLOT William	
• Modélisation des phénomènes mutuels des satellites galiléens de Jupiter.	6 2
DESCAMPS Pascal	
• Analyse spectrale d'observations d'éclipses des satellites galiléens de Jupiter.	6 6
COLAS François	
• Observations astrométriques des petits corps du système solaire avec une caméra CCD.	7 0
ARLOT Jean-Eudes	
• Ephémérides des satellites naturels des planètes. Centre de données astrométriques sur les satellites.	7 3
SATRE Germaine	
• Diffusion de renseignements par MINITEL.	7 6
BERGEAL Liliane	
• Les publications.	7 8
• Renseignements astronomiques.	8 2
MORANDO Bruno	
• Histoire de l'astronomie publiée par l'UAI.	8 3
CHAPRONT-TOUZE Michelle et MORANDO Bruno	
• Condorcet et la mécanique céleste.	8 4



## SOLUTIONS PERIODIQUES EN MECANIQUE CELESTE

### I. Stellmacher

La théorie de la synchronisation de Haag est utilisée pour la recherche des solutions périodiques à "courte période" dans différents problèmes de mécanique céleste et de dynamique galactique.

Le problème non perturbé admet une famille de solutions périodiques de période  $T$ . Si on ajoute des forces perturbatrices la solution du problème perturbé peut être encore périodique de période voisine de  $T$ , et tendre vers une sous famille des solutions périodiques du système non perturbé lorsque la perturbation tend vers zéro.

Les sous familles peuvent être des orbites circulaires, des orbites elliptiques inclinées ou non sur le plan de référence, ce qui généralise la notion d'orbite de première, seconde et troisième sorte de la classification de Poincaré pour le problème des trois corps.

Si la force perturbatrice est périodique de période  $T$ , on recherchera la solution de période  $qT$  voisine de  $pT'$ ,  $p$ ,  $q$  sont des entiers premiers entre eux.

On peut construire par cette méthode les solutions périodiques de nombreux systèmes de mécanique céleste (satellites de Jupiter, Mimas, Théthys - solutions homographiques du problème des  $n$  corps, orbite variationnelle de la Lune).

On peut étendre la recherche aux solutions périodiques à "longue période". C'est la généralisation des orbites de second genre dans la nomenclature de Poincaré.

## REGULARISATION, SOLUTIONS PERIODIQUES, CAPTURES.

C.Edelman.

Pendant ces deux années mon travail de réflexion solitaire a concerné les trois domaines suivants : La régularisation, l'étude des solutions périodiques en tant qu'orbites intermédiaires, et les problèmes de capture. Ces sujets sont très liés entre eux et les applications astronomiques sont relatives aux comètes, aux astéroïdes et aux satellites.

### REGULARISATION INTERNE DU PROBLEME DES DEUX CORPS.

#### 1. Position du problème.

Il s'agit de définir des changements de variables de l'espace-temps transformant une solution singulière du problème des deux corps (d'excentricité supérieure ou égale à un) en une solution régulière de ce problème (d'excentricité strictement inférieure à un). Ce sont des rectifications, car elles ne changent pas les équations. Le problème des  $n$  corps possède des groupes d'invariance mais aucun de ces groupes monoparamétriques dans le cas de deux corps ne font varier l'excentricité de l'orbite. Or ce problème possède l'intégrale de Laplace, donc d'après le théorème de Noether il existe des rectifications associées.

#### 2. Bilan : Construction de familles de rectifications régularisantes.

##### a) Régularisation de l'infini.

Associée au paramétrage polaire des coniques, elle échange deux solutions non bornée et bornée. De type homographique elle ne régularise pas les collisions. Son expression analytique dépend des deux excentricités et de leur valeur par rapport à l'unité.

##### b) Régularisation des collisions.

Associée au paramétrage excentrique des coniques, elle comporte une affinité orthogonale et elle échange deux solutions rectiligne et non rectiligne. Elle ne régularise pas l'infini. Elle dépend des deux excentricités.

##### c) Régularisation des deux singularités.

Il faut considérer la composition de deux transformations de chaque famille; on peut la définir directement à partir du paramétrage universel par

$$X = \sqrt{p} \tan f/2 = \sqrt{a}(1 + e) \tan E/2$$

où  $p$  est le paramètre de la conique  $e$  son excentricité, et  $a$  son demi-grand axe. Une rectification associée aux excentricités est décrite par une transformation homographique de  $X^2$ .

#### Prospectives.

J'aimerais préciser les liens avec les intégrales de Laplace, avec les équations aux variations; j'envisage une hypothétique généralisation à  $n$  corps.

## SOLUTIONS PERIODIQUES, ORBITES INTERMEDIAIRES.

### **Orbites intermédiaires associées à la classification de Poincaré.**

Dans le cadre du problème restreint des trois corps elliptique et dans l'espace, les deux primaires étant le Soleil et une planète. J'ai précisé les méthodes de construction semi-numérique d'orbite périodiques suivantes :

Les solutions de la troisième sorte, d'excentricité et d'inclinaison quelconques.

Celles du second genre, dont la période qui est celle des noeuds et des périastres est un multiple de la période du mouvement principal.

Les solutions de deuxième espèce qui se présentent naturellement dans l'évolution des orbites des comètes ou dans leur capture après un passage au voisinage d'une planète. Elles comportent, à l'ordre zéro, des collisions tangentielles successives au point de contact des orbites de la comète et de la planète; ce point étant l'aphélie de l'orbite de la comète.

Pour certaines comètes du groupe de Jupiter dont la période est commensurable avec celle de Jupiter, ce sont des solutions à la fois de la troisième sorte, du second genre, et de la deuxième espèce qu'il faut considérer.

J'ai également étudié la classification des orbites périodiques du problème perturbé des deux corps à partir du comportement global de certaines variables angulaires et du comportement local du système au voisinage de la valeur nulle du petit paramètre.

### **Choix d'un vecteur d'état lié à celui de Laplace.**

J'ai défini un vecteur d'état adapté au mouvement des comètes du groupe de Jupiter.

La direction de ce vecteur est en libration pour le problème restreint des trois corps.

La direction de ce vecteur circule pour un corps gravitant autour d'un sphéroïde aplati, sauf pour des valeurs particulières de l'inclinaison.

### **Prospectives.**

J'aimerais employer un des manipulateurs algébriques du B.D.L. associé à un algorithme purement numérique pour construire les orbites intermédiaires ci-dessus, selon une méthode apparentée à celle de Hill.

## CAPTURE DES COMETES.HYPOTHESE DE LEUR FRAGMENTATION.

### **1. Position du problème.**

J'ai étudié le choc d'une particule quelconque avec une planète tel que l'a défini Poincaré pour les solutions périodiques de seconde espèce mais pour deux planètes.

Il s'agit d'un problème classique de choc tel qu'il est défini par P.Appell. Des forces extrêmement grandes sont appliquées à la particule pendant un temps très court modifiant sa vitesse de façon discontinue.

### **2. Bilan.**

En appliquant le Principe de Moindre Action à la phase du choc j'ai retrouvé le scénario "idéal" de capture décrit dans ma thèse d'état; je l'ai testé sur les éléments observés des comètes du groupe de Jupiter; l'hypothèse de fragmentation de Bredikhin n'est pas en contradiction avec la distribution actuelle des éléments déduits des observations de ces comètes, de certains astéroïdes et météorites.

## Evolution à long terme et mouvement chaotique du Système Solaire.

J. Laskar

### Contexte général

Le problème de l'évolution à long terme et de la stabilité du système solaire s'est posé dès la formulation des équations de Newton il y a 300 ans. Laplace et Lagrange y ont apporté une contribution décisive en démontrant analytiquement qu'au premier ordre par rapport aux petites quantités (masses, excentricité, inclinaison) le mouvement du système solaire est quasi-périodique. Poincaré a ensuite montré que si ce résultat est vrai en première approximation, il ne subsiste pas dans le problème complet du fait de la non-convergence des séries de perturbation utilisées. Plus récemment, la théorie de KAM montre au contraire que sous certaines conditions il peut exister un grand nombre de solutions quasi-périodiques, mais ces conditions exigent des masses planétaires trop petites pour s'appliquer au système solaire réel. Le problème de la stabilité du système solaire reste donc entier.

Depuis peu, la rapidité des ordinateurs permet d'effectuer l'intégration numérique directe des équations de Newton sur de très longues périodes allant jusqu'à près d'un milliard d'années. Une équipe du MIT (J. Wisdom et G. Sussman) a mis en évidence en 1988 de cette manière la nature chaotique du mouvement de Pluton avec un exposant de Lyapounov positif de l'ordre de  $1/(20 \text{ millions d'années})$ . Cependant, pour le moment, les planètes intérieures (Mercure, Venus, Terre, Mars) sont écartées dans ces études à cause de leur trop grande vitesse orbitale.

### Evolution à long terme du système solaire

Mon approche dans l'étude de la stabilité du système solaire est différente, et utilise les travaux que j'ai effectué sur les théories planétaires générales depuis mon entrée au Bureau des Longitudes, dans la lignée des travaux de V. Brumberg, J. Chapront et L. Duriez. J'ai d'abord transformé le système des équations de Newton, pour obtenir un nouveau système différentiel donnant les variations séculaires des éléments des orbites des 8 planètes principales du système solaire. Cette transformation (moyennisation) est conduite de manière extensive à l'ordre 2 des masses et jusqu'au degré 5 en excentricité et inclinaison, en incluant les contributions relativistes et lunaires. Le système complet est très imposant (150 000 termes polynômiaux), mais il ne possède plus de termes à courte période, et peut ensuite être intégré numériquement avec un très grand pas de l'ordre de 500 ans (Laskar, J., 1985, *A&A* 144, 133-146).

Grâce à la structure spéciale des séries, j'ai pu vectoriser très efficacement les programmes et les intégrations numériques ont été effectuées sur le CRAY1 du CCVR, puis sur le VP200 du CIRCE (grâce à une allocation spécifique du CNRS depuis 1988, et avec l'aide technique de G. Satre). Les solutions sont ensuite analysées de manières diverses correspondant à des échelles de temps différentes.

- Sur 10 000 ans les solutions sont développées en polynômes du temps d'ordre 10 pour fournir les termes séculaires des théories classiques et donc permettre de les prolonger sur de telles durées. Ces premières intégrations servent aussi à contrôler la qualité des approximations effectuées (Laskar, J. 1986, *A&A* 157, 59-70).

- Sur 10 millions d'années, les solutions sont analysées par une méthode de Fourier modifiée que j'ai mise au point et qui permet une haute résolution en fréquence. Ceci permet d'obtenir une forme quasi-périodique des solutions analogue à ce qu'aurait pu donner une intégration analytique. Ces solutions incluent aussi les termes de la précession et peuvent être utilisées comme une éphéméride pour le mouvement à long terme du système solaire (Laskar, J. 1988, *A&A* 198, 341-362). Elles sont en particulier utilisées actuellement par A. Berger (Louvain-la-Neuve) et M. Revault-d'Allones (Muséum d'Histoire Naturelle) pour l'étude des paléoclimats de la Terre, et par W. Ward au JPL pour l'étude des paléoclimats de Mars.

### Amélioration des éphémérides sur 10 millions d'années.

Dans les solutions récentes, une correction a été apportée au système séculaire par ajustement à l'origine par moindre carrés sur les termes en  $t$  de VSOP82. Avec cette correction, les écarts entre les fréquences fondamentales du système séculaire et celles des intégrations numériques des planètes extérieures sont réduits

à 0.01"/an. Les amplitudes des termes deviennent aussi tous très proches des amplitudes des termes correspondants obtenus par les intégrations numériques directes effectuées sur plusieurs centaines de millions d'années (Laskar, 1990). La précision à l'origine sur les fréquences principales des planètes intérieures peut être de son côté estimée à quelques millièmes de secondes d'arc par an. Les nouvelles solutions fournissent donc une éphéméride de bonne qualité sur 10 millions d'années, tant pour les planètes intérieures que pour les planètes extérieures. Ces nouvelles solutions seront bientôt rendues disponibles aux utilisateurs.

### Le mouvement chaotique du système solaire.

Sur 200 millions d'années j'ai découvert un exposant de Lyapounov positif de valeur relativement élevée (1/5 Millions d'années) par rapport à l'âge du système solaire. Ceci met en évidence pour la première fois le caractère chaotique du système solaire, et en particulier du système solaire interne (Mercure, Venus, Terre, Mars). La divergence exponentielle des orbites initialement proches fournit alors une limite de prédictibilité pour le mouvement du système solaire. Si il est effectivement possible de fournir une solution approchée pour le mouvement du système solaire sur 10 millions d'années, il n'est plus possible de le faire sur 100 millions d'années (des différences de  $10^{-10}$  sur les conditions initiales conduisent à des erreurs de seulement  $10^{-9}$  après 10 millions d'années, mais atteignent 100% après 100 millions d'années) (Laskar J., 1989, *Nature*, **338**, 237-238). Ceci montre en particulier que le projet initial de fournir des éphémérides sur 100 millions d'années et plus pour le mouvement des planètes n'a plus aucun sens pour ce qui concerne les planètes intérieures.

Depuis la parution de ces résultats, j'ai poursuivi l'analyse de ma solution afin d'identifier l'origine du chaos dans le système solaire. Celui-ci est du à la présence de résonances séculaires importantes entre les mouvements de précession des noeuds et des périhélie des planètes intérieures, et en particulier entre La Terre et Mars où on peut observer des phénomènes de transition entre la libration et la circulation, caractéristiques des mouvements chaotiques.

J'ai aussi développé une nouvelle méthode numérique pour mesurer la largeur des zones chaotiques dans les systèmes à plus de deux degrés de liberté. La méthode, appliquée au système solaire, montre que les zones chaotiques du système solaire intérieur sont larges. Ceci confirme la nature chaotique du système, en montrant que même sous l'effet d'une petite perturbation supplémentaire, le mouvement restera chaotique. Pour les planètes extérieures, la plupart des zones chaotiques sont beaucoup moins large, même si certaines restent significatives sur l'âge du système solaire (Laskar, 1990).

### Publications.

- Laskar, J.: 1987, 'Secular evolution, proper modes and resonances in the inner Solar System', in *Resonances in the Solar System*, Sidlichovsky ed., Prague 1987
- Laskar, J.: 1988, 'Secular evolution of the Solar System over 10 million years', *Astron. Astrophys.* **198**, 341-362
- 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, *soumis à Icarus*.

## Développement du manipulateur algébrique TRIP

J. Laskar

Les calculs en Mécanique Céleste nécessitent la manipulation d'expressions analytiques volumineuses. Il existe des logiciels traitant de telles expressions, développés depuis plusieurs années essentiellement en LISP, tels REDUCE ou MACSYMA. Malheureusement, ces logiciels sont souvent mals adaptés aux calculs en mécanique céleste. Ceci a conduit les astronomes à développer leurs propres logiciels, le plus souvent en FORTRAN, directement adaptés à un problème particulier. Ces différents logiciels sont en général très rapide mais ne sont pas portables ou n'offrent pas la souplesse des logiciels généraux tels REDUCE ou MACSYMA.

J'ai entrepris la construction d'un nouveau manipulateur algébrique en langage C destiné à la mécanique céleste. Le choix du langage C a été retenu pour son efficacité dans les calculs en flottants, la possibilité de définir des structures et des types, et pour la grande portabilité du langage.

Pour le moment, J'ai commencé un premier prototype lors du stage d'été (88) d'un étudiant en informatique (E. Paviot). Le programme TRIP est maintenant programme d'environ 12000 lignes de programmation avancée (arbres, listes, tris, récursivité, automates,...). Il peut être utilisé dès maintenant pour effectuer certains calculs et pourra être complété par la suite. Il comprend essentiellement un analyseur syntaxique qui permet de rentrer des expressions algébriques, et des routines effectuant les opérations élémentaires (addition, multiplication, troncature, ordre, dérivation, intégration, substitution, etc...) sur des séries trigonométriques à coefficients polynomiaux générales (nombre de variables et degré quelconque). Les données peuvent coexister sous deux formes simultanément de manière transparente pour l'utilisateur.

Actuellement, ce manipulateur est déjà utilisé de manière expérimentale par L. Duriez et A. Vienne à l'Université de Lille pour la construction d'une théorie des satellites de Saturne. Il a été aussi utilisé pour le calcul des perturbations solaires des satellites d'Uranus par Ch. Dumoulin (stage de DEA). Un projet est en cours avec le CNES qui est intéressé par les applications du manipulateur à l'étude à long terme des orbites des satellites artificiels.

Initialement développé sur PC, puis sur MACII, il serait souhaitable actuellement de poursuivre le développement sur station de travail Unix. Un tel choix permet de bénéficier d'un environnement conçu pour le langage C, et assure la possibilité d'utiliser certains utilitaires de développement comme les analyseurs syntaxiques et générateurs de compilateurs Lex et Yacc. De plus, il permet de communiquer plus facilement avec les développeurs de systèmes équivalents et permet d'utiliser les logiciels de GNU. Une tel choix s'inscrit aussi dans la stratégie actuelle du CIRCE qui a installé depuis peu le système AIX (l'Unix d'IBM) au CIRCE, l'utilisateur devant développer ses applications en local sur une station Unix et effectuer les exécutions lourdes en CPU ou espace mémoire au CIRCE.

### Publications.

Laskar, J.: 1989, Manipulation des Séries, in *Méthodes Modernes de la Mécanique Céleste* D. Benest ed., Goutelas, 1990.

# PROBLÈMES NUMÉRIQUES DANS LES THÉORIES SEMI-NUMÉRIQUES PLANÉTAIRES.

Frédéric Joutel

## I) Problème des séries de Poisson.

La méthode formelle de recherche des solutions semi-numériques consiste, en premier lieu, à obtenir le développement de la solution sous forme de séries analytiques dépendant des angles moyens, puis, en développant en série de Taylor la partie périodique dépendant des angles variant lentement, d'avoir la solution sous forme de séries de Poisson dépendant du temps et des longitudes moyennes. Cependant ce travail serait gigantesque pour obtenir une bonne précision sur un intervalle de temps de l'ordre de 1000 ans. Pour créer pratiquement une théorie semi-numérique, en raisonnant ordre par ordre par rapport aux masses, on se limite à obtenir progressivement le développement en séries de Poisson des seconds membres des équations de Lagrange, en ne gardant comme variables que  $t$  et les longitudes moyennes. On est obligé, pour faire cela, de construire les différentielles successives des seconds membres des équations de Lagrange et de manipuler d'énormes quantités de termes. Aussi, le problème s'est posé d'obtenir directement un développement en série de Poisson de la solution du système d'équations différentielles, ou tout au moins une approximation de la solution valable sur un intervalle de temps  $[0, T]$ .

Considérons  $\mathcal{E}$  l'espace vectoriel de dimension finie engendré par les fonctions  $t^m e^{i\mu t}$  où  $m$  est un entier variant entre 0 et  $M$  et  $\mu$  un réel variant dans un ensemble fini  $\mathcal{R}$ . On peut montrer que la famille des fonctions  $t^m e^{i\mu t}$  est linéairement indépendante sur  $[0, T]$ .

### a) Approximation au sens des moindres carrés.

Si nous considérons la norme  $\|\cdot\|_2$  sur l'ensemble  $L_2$  des fonctions de carré intégrable sur  $[0, T]$ , nous pouvons trouver, pour toute fonction  $x \in L_2$ , une unique fonction  $X$  dans  $\mathcal{E}$ , meilleure approximation au sens de la norme considérée ( $X$  est la projection orthogonale de  $x$  sur  $\mathcal{E}$ ).

Pour trouver cette projection, il semble nécessaire de trouver une base orthonormée de  $\mathcal{E}$ , par exemple par le procédé d'orthonormalisation de Schmidt, de calculer ensuite les produits scalaires entre  $x$  et les éléments de cette base, pour aboutir enfin à  $X$  par combinaison linéaire. Le cardinal important de la famille à orthonormaliser, et donc le nombre des intégrales à calculer devrait cependant entacher le résultat d'une erreur numérique importante.

### b) Approximation uniforme.

Considérons maintenant l'espace des fonctions continues sur  $[0, T]$ , muni de la norme uniforme :  $\|\cdot\|_\infty$ . Nous savons qu'il existe alors, pour une fonction  $x$  continue, au moins une fonction  $X \in \mathcal{E}$  vérifiant:

$$\|x - X\|_\infty = \inf_{y \in \mathcal{E}} \|x - y\|_\infty.$$

De plus, si  $\mathcal{E}$  vérifie la condition de Haar:

Toute fonction non nulle de  $\mathcal{E}$  possède au plus  $\text{Dim}(\mathcal{E})-1$  zéros. } Haar

on a alors unicité de la fonction  $X \in \mathcal{E}$ .

Cependant, trouver un majorant du nombre de zéros d'une fonction de  $\mathcal{E}$  est un problème que je n'ai pas su résoudre, on peut néanmoins remarquer que ce nombre dépend de l'ensemble  $\mathcal{R}$  et de la longueur de l'intervalle  $[0, T]$ , en particulier, il faut, pour que la condition de Haar soit vérifiée, que, pour tout  $\mu \in \mathcal{R}$ :

$$\mu < \frac{2\pi}{T} \text{Dim}(\mathcal{E}) - 1$$

et ceci simplement pour que la fonction  $1 + e^{i\mu t}$  ne possède pas trop de zéros. Remarquons également que cette majoration donne dans le cas qui nous intéresse - Problème des quatre grosses planètes - la non-unicité d'une meilleure approximation uniforme si la longueur de l'intervalle est supérieur à 400000 ans, mais un tel intervalle de temps est hors d'atteinte des théories semi-numériques.

D'autre part, si l'on considère, non plus la recherche de la meilleure approximation, mais simplement celle d'une bonne approximation uniforme, on peut se trouver devant des séries de Poisson ayant des formes différentes, mais qui donnent sensiblement les mêmes résultats.

Considérons par exemple, dans les cas des quatre grosses planètes, les arguments  $\theta_1 = (\eta_1 - 3\eta_2 + 3\eta_3)t$  et  $\theta_2 = 3\eta_4 t$ .  $\theta_1$  et  $\theta_2$  ont des périodes de 55 ans environ tandis que  $\theta_3 = \theta_1 - \theta_2$  a une période de 24107 ans. Ainsi

$$\begin{aligned} \cos \theta_1 &= \cos \theta_3 \cos \theta_2 - \sin \theta_3 \sin \theta_2 \\ &\approx \left(1 - \frac{\theta_3^2}{2} + \frac{\theta_3^4}{24}\right) \cos \theta_2 - \left(\theta_3 - \frac{\theta_3^3}{6}\right) \sin \theta_2, \end{aligned}$$

à  $10^{-5}$  près sur 1000 ans. Deux séries peuvent donc différer par des termes de fréquences voisines; et une étude plus approfondie serait nécessaire pour déterminer si le phénomène ne peut pas se produire d'une autre façon.

La recherche directe d'une approximation en séries de Poisson semble donc difficile, aussi considère-t-on, non plus le problème d'une fonction ne dépendant que du temps, mais celui d'une fonction dépendant du temps et de plusieurs variables angulaires, ce qui permet de construire, de façon naturelle, des approximations en séries de Poisson par analyse harmonique, par manipulation de séries de Fourier, ou encore par intégration ordre par ordre par rapport au masses.

## II) Problème des Longues Courtes Périodes.

Considérons les équations de Lagrange pour un problème planétaire semi-numérique de quatre planètes. Formellement, elles peuvent s'écrire, en ne gardant comme variables

que les longitudes moyennes et en développant en fonction du temps les fonctions angulaires des angles lents:

$$\frac{d}{dt} \left( \sum_{k \in \mathbb{Z}^4} x_k(t) e^{ik \cdot \bar{\lambda}} \right) = \sum_{k \in \mathbb{Z}^4} a_k(t) e^{ik \cdot \bar{\lambda}}, \quad (1)$$

où  $x(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}^4} x_k(t) e^{ik \cdot \bar{\lambda}}$  est la solution cherchée,  $\sum_{k \in \mathbb{Z}^4} a_k(t) e^{ik \cdot \bar{\lambda}}$  le développement des seconds membres des équations de Lagrange pour la solution  $x$ ; les termes  $x_k$  et  $a_k$  étant des fonctions quasi-périodiques du temps. Nous ne pouvons résoudre ce système général, et les approximations cherchées sont des séries de Poisson tronquées à l'ordre  $n$  en temps, que l'on peut espérer être obtenues à partir des séries de Taylor tronquées à l'ordre  $n$  des fonctions  $x_k$  (hypothèse forte (HF)), ou tout du moins que les seconds membres des équations de Lagrange soient obtenues de cette façon (hypothèse faible (Hf)), (HF) entraînant (Hf).

Deux questions se posent:

- 1) le processus itératif, à un ordre  $n$  donné, est-il convergent?
- 2) le processus étant convergent, peut-on obtenir, pour  $n$  assez grand, des bonnes approximations de la solution ?

Je n'ai toujours pas de réponse à la question 1, quoique je pense que non, si l'on n'élimine pas, à priori, les termes à Longues Courtes Périodes, dont certains sont découverts à posteriori, dans les séries recherchées. En revanche, je peux donner une réponse partielle à la deuxième question dans ce qui suit.

Supposons tout d'abord le processus convergent, et examinons la découverte, au fil des itérations, des approximations polynomiales de la solution en fonction des approximations polynomiales des seconds membres des équations de Lagrange.

Plaçons nous dans le cas idéal de l'hypothèse (Hf).

L'équation (1) est la somme d'équations différentielles linéaires, du type:

$$\frac{d}{dt} (x(t) e^{i\mu t}) = a(t) e^{i\mu t} \quad (2)$$

où on a posé  $\mu = k_1 \eta_1 + \dots + k_4 \eta_4$ ,  $\eta_1, \dots, \eta_4$  étant les moyens mouvements moyens des longitudes.  $\mu$  est supposée être une constante réelle non nulle,  $x$  et  $a$  des fonctions quasi-périodiques.

Nous savons intégrer cette équation linéaire,  $x$  doit vérifier l'équation

$$\dot{x} + i\mu x = a$$

et donc:

$$x(t) = \left( \int_0^t a(s) e^{i\mu s} ds + \lambda_0 \right) e^{-i\mu t},$$

$\lambda_0$  étant une constante arbitraire.

$a$  étant une fonction quasi-périodique, nous pouvons supposer que  $a$  est de la forme  $a(t) = \sum_{\alpha} a_{\alpha} e^{i\alpha t}$ , où les  $\alpha$  sont des réels. Et puisque le second membre de cette équation

linéaire est une somme, nous pouvons supposer tout d'abord que  $a(t) = e^{i\alpha t}$ , la solution générale sera alors obtenu par combinaison linéaire des solutions partielles.

On trouve alors:

$$x(t) = \frac{1}{i(\alpha + \mu)} e^{i\alpha t} + \lambda'_0 e^{-i\mu t},$$

où  $\lambda'_0$  est une contante arbitraire, si  $\alpha + \mu \neq 0$  et

$$x(t) = (t + \lambda_0) e^{i\mu t}$$

si  $\alpha + \mu = 0$ .

Approchons  $a$  par sa série de Taylor tronquée à l'ordre  $n$ :

$$[a]_n(t) = \sum_{k=0}^n \frac{(i\alpha)^k}{k!} t^k,$$

et cherchons l'unique solution polynomiale  $x_n$  de l'équation  $\dot{x} + i\mu x = [a]_n$ .

On trouve:

$$x_n(t) = \frac{1}{i(\alpha + \mu)} \left( [e^{i\alpha t}]_n - \left( -\frac{\alpha}{\mu} \right)^{n+1} [e^{-i\mu t}]_n \right)$$

si  $\alpha + \mu \neq 0$  et

$$x_n(t) = \left[ \left( t + \frac{n+1}{i\mu} \right) e^{-i\mu t} \right]_n$$

si  $\alpha + \mu = 0$ .

On en déduit donc:

- si  $\left| \frac{\alpha}{\mu} \right| < 1$ , la suite  $(x_n)$  converge vers  $x(t) = \frac{1}{i(\alpha + \mu)} e^{i\alpha t}$  uniformément sur un intervalle compact et que de plus si  $\left| \frac{\alpha}{\mu} \right| \ll 1$ ,  $x_n(t) \approx x(t)$ ;
- si  $\left| \frac{\alpha}{\mu} \right| \geq 1$ , la suite  $(x_n)$  diverge,

En conclusion, nous pouvons alors répondre partiellement à la question 2:

- Dans un cas général, l'hypothèse forte (HF) ne peut être vérifiée, mais, dans le cas où toutes les pulsations  $\alpha$  sont très petites par rapport aux pulsations  $\mu$  correspondantes, l'approximation  $x_n$  est très proche de la série tronquée de Taylor d'une solution  $x$ ,

- sous l'hypothèse faible (Hf), s'il existe une pulsation  $\alpha$  supérieure ou égale à la pulsation  $\mu$  ( $\mu$  est la pulsation d'une Longue Courte Période), la partie polynomiale des séries de Poisson ne converge pas, et donc que ce n'est pas en cherchant à pousser à un ordre toujours plus élevé, les approximations que nous pourrons trouver une théorie acceptable. Le seul remède est alors à ne pas chercher une série de Poisson contenant des termes à Longues Courtes Périodes, et à éliminer un de ces termes, dès qu'on se doute du phénomène, en développant la fonction  $x(t)e^{ik\lambda}$  en polynôme du temps seul.

## THEORIES PLANETAIRES GENERALES

P. Bretagnon

### 1. Introduction

L'évolution des orbites planétaires étudiées depuis Lagrange et Laplace a donné lieu à de nombreux travaux surtout depuis quelques décennies avec les publications de Brouwer et van Woerkom (1950), Anolik *et al* (1969), Bretagnon (1974), Duriez (1979), Bretagnon (1984), Laskar (1988).

Les théories planétaires à variations séculaires telles que VSOP82 (Bretagnon, 1982), TOP82 (Simon, 1983) atteignent une très grande précision. Toutefois, par construction, dans ces théories les variations périodiques des périhélie et des nœuds sont développées en polynômes du temps ce qui limite la validité de ces solutions à quelques milliers d'années.

Au contraire, les théories générales conservent analytiquement, outre les longitudes moyennes de l'ensemble des planètes, les arguments du périhélie et du nœud de chaque planète. L'intervalle de validité des solutions n'est plus alors limité que par la précision de détermination des fréquences à longues périodes des périhélie et des nœuds. Ces solutions comportent un nombre de termes beaucoup plus grand que les théories à variations séculaires. Ce sont en effet des séries de Fourier dont les arguments sont, si on considère les 8 planètes principales, des combinaisons linéaires de 24 composantes. La prolifération des termes dans les théories générales limite évidemment la précision de ces solutions.

### 2. Solution numérique

Une autre approche pour l'étude des variations des orbites planétaires à longues périodes est l'intégration numérique. Après des intégrations sur des intervalles de l'ordre du million d'années, telle l'intégration de Cohen *et al* (1973), le développement de la rapidité des ordinateurs a permis récemment des intégrations numériques sur des temps importants : intégration des 5 planètes extérieures sur 5 millions d'années (Kinoshita et Nakai, 1984), sur 214 millions d'années (Applegate *et al*, 1986), sur 100 millions d'années (Milani *et al*, 1987).

Dans les intégrations numériques, l'intégration directe des équations du mouvement s'effectue à une très grande précision. Seule la longitude, sous l'effet des erreurs d'arrondi, se dégrade de manière sensible après plusieurs dizaines de millions d'années. Toutefois cet effet ne se répercute que faiblement sur les éléments définissant l'orbite. Actuellement, ces intégrations ne concernent que les grosses planètes Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune car l'intégration de l'ensemble du système solaire demanderait une durée prohibitive d'exploitation sur ordinateur. En effet, le pas d'intégration est choisi en fonction des accélérations du corps le plus rapide : Mercure impose un pas 50 fois plus petit que Jupiter. De plus, ajouter les 4 planètes inférieures entraîne une multiplication du volume des calculs par un facteur compris

entre 2 et 4 selon la méthode utilisée (voir Applegate *et al*, 1986). Finalement, passer du système des planètes extérieures au système planétaire complet demande un temps d'ordinateur 100 à 200 fois plus grand.

### 3. Solution analytique

La difficulté des méthodes analytiques provient de la croissance très rapide de la complexité des formulaires en fonction de l'ordre des masses planétaires. Les solutions analytiques actuelles sont toutes limitées au deuxième ordre par rapport aux masses ce qui réduit l'intervalle de validité à un million d'années en particulier pour Jupiter et Saturne, planètes pour lesquelles les perturbations du troisième ordre des masses sont très importantes.

### 4. Méthode itérative

Nous avons donc développé une méthode itérative de construction de théories planétaires générales (Bretagnon, 1990) qui permet, en principe, de développer les perturbations à tous les ordres par rapport aux masses, les limitations en précision n'intervenant que par la troncature des séries de Fourier dans la construction analytique des seconds membres des équations de Lagrange.

Cette méthode a été appliquée au couple Jupiter-Saturne (Bretagnon et Simon, 1990) et a donné de bons résultats pour les variables  $k$ ,  $h$ ,  $q$  et  $p$ . Par contre, nous avons rencontré de grandes difficultés de convergence pour les termes à longue période des demi-grands axes de Jupiter et de Saturne. Nous avons été alors amenés à déterminer les amplitudes des multiples de l'argument  $\psi_5 - \psi_6$  de période 54 000 ans par ajustement aux termes séculaires qui ont été calculés à une très grande précision par la méthode de Simon et Joutel (1988).

### 5. Résultats

Un résultat important de la détermination précise de ces termes à longue période du demi-grand axe est l'obtention des termes à longue période qu'ils produisent dans la longitude moyenne par intégration du moyen mouvement. Les amplitudes de ces termes sont quatre fois plus grandes que celle de la grande inégalité  $2\lambda_5 - 5\lambda_6$  et dépassent  $12\,000''$  dans la longitude moyenne de Saturne.

L'importance de ces amplitudes vient de ce que les diviseurs des termes à longue période sont proportionnels aux masses planétaires. Comme les termes séculaires (Duriez, 1978), les termes à longue période du demi-grand axe sont essentiellement, avant intégration, du troisième ordre par rapport aux masses. Après intégration, ils sont du deuxième ordre par rapport aux masses. Le moyen mouvement est lié au demi-grand axe par la troisième loi de Kepler et l'intégration des longues périodes du moyen mouvement donne des termes à longue période du premier ordre par rapport aux masses dans la longitude moyenne.

Ces termes n'ont jamais été pris en compte jusqu'à présent dans les théories générales planétaires analytiques. Ils vont, bien entendu, jouer un rôle très important dans le calcul des perturbations sur les autres planètes et ils modifient complètement la nature des constantes d'intégration liées à la longitude.

La bonne convergence des solutions permet d'estimer l'incertitude sur les fréquences au niveau de  $0,000\,13''/\text{an}$  ce qui donne un intervalle de validité de la solution du problème étudié supérieur à un milliard d'années. Ceci est confirmé par la comparaison de la solution analytique à une intégration

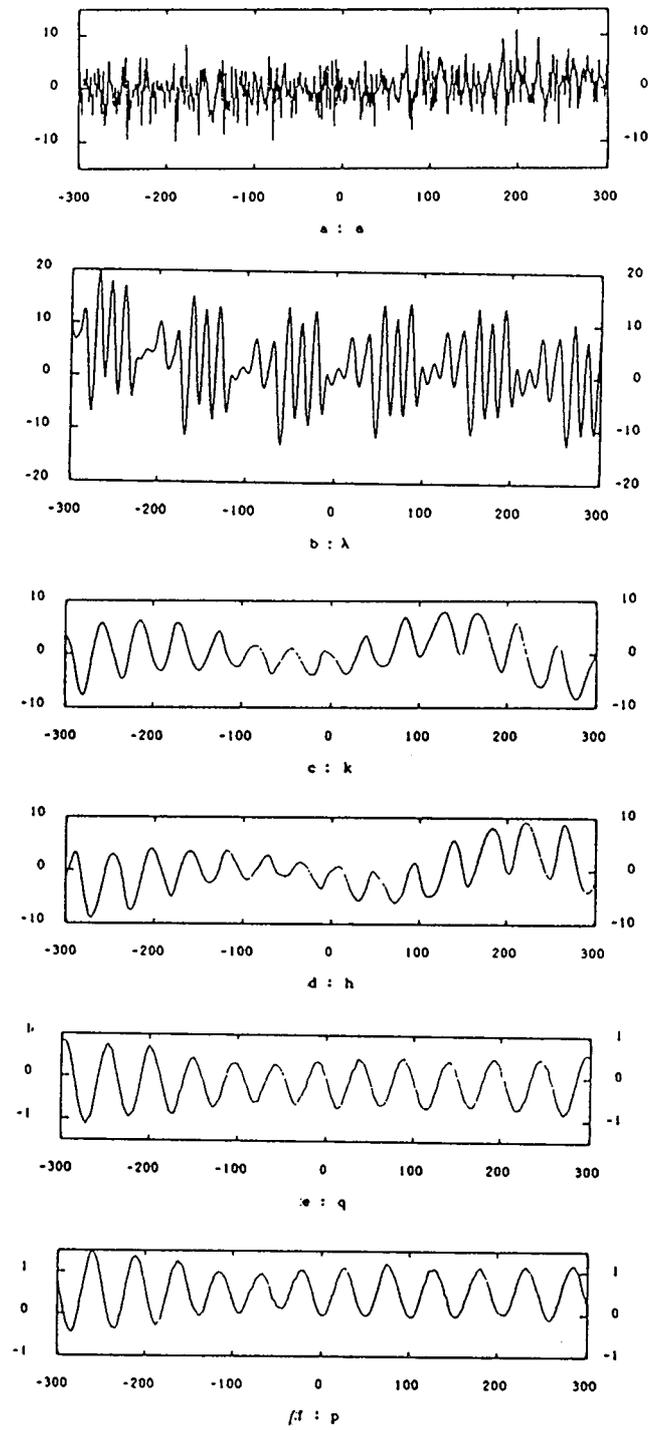


Fig. a-f. *Saturne*. Comparaison de la théorie générale à l'intégration numérique. L'unité est  $10^{-6}$  UA pour le demi-grand axe,  $10^{-6}$  radian pour les autres variables. Le temps est en milliers d'années.

numérique sur 600 000 ans : 300 000 ans de part et d'autre de J2000.0. Les écarts sont en effet toujours plus petits que  $10^{-5}$  pour les variables  $k$ ,  $h$ ,  $q$  et  $p$ . Cette comparaison montre également que la précision de la longitude sur 600 000 ans est de  $5''$ . La figure donne les écarts, pour Saturne, entre la théorie générale et l'intégration numérique.

## 6. Conclusion

Dans notre construction d'une théorie du couple Jupiter-Saturne, la création des termes périodiques n'est obtenue que par combinaison de 6 arguments : les 2 longitudes moyennes et les quatre arguments à longue période  $\psi_5$ ,  $\psi_6$ ,  $\theta_5$  et  $\theta_6$ . Nous avons donc pu opérer sur des séries de Fourier à nombre de termes raisonnable. A la précision de notre calcul, la plus grosse série est le cube de l'inverse de la distance entre Jupiter et Saturne et contient environ 27 000 termes périodiques. Cette série est calculée à la précision relative de  $2 \times 10^{-10}$ .

Il est nécessaire maintenant d'étendre la méthode à l'étude des quatre planètes Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. Les termes périodiques des séries de Fourier représentant les solutions seront alors des combinaisons linéaires de 12 arguments et non plus de 6. Il est donc à prévoir une augmentation importante du volume des solutions et un accroissement considérable des temps de calcul.

## Bibliographie

- Anolik, M. V., Krassinsky, G. A., Pius, L. J.: 1969, *Trudy Inst. Theor. Astron. Leningrad* **14**, 3-47  
Applegate, J. H., Douglas, M. R., Gursel, Y., Sussman, G. J., Wisdom, J.: 1986, *Astron. J.* **92(1)**, 176  
Bretagnon, P.: 1974, *Astron. Astrophys.* **30**, 141  
Bretagnon, P.: 1982, *Astron. Astrophys.* **114**, 278  
Bretagnon, P.: 1984, in *Milankovitch and Climate, Part I*, eds. A. L. Berger et al, Reidel, Dordrecht, 41  
Bretagnon, P.: 1990, *Astron. Astrophys.* à paraître  
Bretagnon, P., Simon J. L.: 1990, *Astron. Astrophys.* à paraître  
Brouwer, D., van Woerkom, A. J. J.: 1950, *APAE XIII*, 2  
Cohen, C. J., Hubbard, E. C., Oesterwinter, C.: 1973, *APAE XXII*, 1  
Duriez, L.: 1978, *Astron. Astrophys.* **68**, 199  
Duriez, L.: 1979, *Approche d'une Théorie Générale Planétaire en variables elliptiques héliocentriques*, Thèse, Lille  
Kinoshita, H., Nakai, H.: 1984, *Celes. Mech.* **34**, 203  
Laskar, J.: 1988, *Astron. Astrophys.* **198**, 341  
Milani, A., Nobili, A. M., Carpino, M.: 1987, *Astron. Astrophys.* **172**, 265  
Simon, J. L.: 1983, *Astron. Astrophys.* **120**, 197  
Simon, J. L., Joutel, F.: 1988, *Astron. Astrophys.* **205**, 328

## THÉORIES PLANÉTAIRES A VARIATIONS SÉCULAIRES EN FONCTION D'UN SEUL ARGUMENT ANGULAIRE

J.L. Simon

### 1. Introduction

Plusieurs travaux récents (Simon et Francou, 1982 ; Simon et Bretagnon, 1984) ont montré qu'il était possible de calculer avec une très grande précision les perturbations mutuelles de Jupiter et Saturne par analyse harmonique en fonction des 2 longitudes moyennes. Le calcul des perturbations planétaires par analyse harmonique en fonction d'un seul argument angulaire répond à deux objectifs :

— Trouver une représentation plus compacte que les représentations classiques pour le mouvement de Jupiter et Saturne, en utilisant les résultats des théories générales.

— Faciliter l'extension de la méthode au problème des 4 grosses planètes, le passage d'une analyse harmonique à 2 arguments à une analyse à 4 arguments entraînant une troncature de la liste d'arguments qui nuit à la précision de la solution (Joutel, 1990).

### 2. Représentation en fonction d'un seul argument angulaire

#### 2.1. Notations.

Nous considérons un couple de planètes  $P(m)$ ,  $P'(m')$ . Nous notons  $x$  les 12 variables représentant le mouvement de  $P$  et  $P'$ ,  $s$  les variables  $x$  autres que les longitudes moyennes  $\lambda$  et  $\lambda'$ ,  $x_0$  et  $s_0$  les constantes d'intégration de  $x$  et  $s$ ,  $\bar{\lambda}$  l'argument  $\bar{\lambda} = \lambda_0 + n t$  où  $n$  est le moyen mouvement de la planète.

#### 2.2. Méthode. (Simon et Joutel, 1988)

Nous définissons un argument de base  $\mu$  par :

$$(1) \quad \bar{\lambda} - \lambda_0 = n t = q \mu + \varepsilon t; \quad \bar{\lambda}' - \lambda'_0 = n' t = q' \mu + \varepsilon' t.$$

où  $q$  et  $q'$  sont des entiers fixés et où  $\varepsilon$  et  $\varepsilon'$  sont très petits devant  $n$  et  $n'$ .

On calcule par itération les seconds membres des équations de Lagrange, sous forme fermée par rapport aux variables (Chapront et al, 1975), pour  $j + 1$  valeurs du temps. Les seconds membres sont développés par analyse harmonique puis intégrés et finalement notre solution a la forme :

$$(2) \quad x = x_0 + x_1 t + \dots + x_{j+1} t^{j+1} + S_0(\mu) + t S_1(\mu) + \dots + t^j S_j(\mu)$$

où  $x_1 \dots x_{j+1}$  sont les termes séculaires et où  $S_0, S_1, \dots, S_j$  sont des séries de Fourier de  $\mu$ .

#### 2.3. Application au couple Jupiter-Saturne

Choix de l'argument de base.

Nous avons choisi notre argument de base en tenant compte des particularités suivantes :

a) L'argument de plus courte fréquence rencontré dans le problème est la grande inégalité  $5\bar{\lambda}' - 2\bar{\lambda}$ , de période 883 ans. Il est naturel de chercher un argument  $\mu$  de période voisine vérifiant la relation :

$$(3) \quad 5(\bar{\lambda}' - \lambda'_0) - 2(\bar{\lambda} - \lambda_0) = \mu + \sigma t, \quad \text{où } \sigma \text{ est petit devant } n \text{ et } n'.$$

b) Pour éviter que les relations (1) ne conduisent à des développements en puissance du temps d'ordre trop élevé pour les arguments à courte période du type  $p(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}')$ , on impose la relation :

$$(4) \quad (\bar{\lambda} - \lambda_0) - (\bar{\lambda}' - \lambda'_0) = (n - n')t = r\mu, \quad \text{où } r \text{ est un entier.}$$

c) D'après Duriez (1979), la perturbation à longue période la plus importante correspondant à la grande inégalité, que l'on trouve dans une théorie générale du couple Jupiter-Saturne, a la forme  $A \sin(5\bar{\lambda}' - 2\bar{\lambda} - 0,41t)$ , l'unité du coefficient du temps étant le radian par milliers d'années. On choisira un argument  $\mu$  pour lequel le coefficient  $\sigma$  de la formule 3 est le plus proche possible de 0,41 radian par milliers d'années de façon à obtenir des développements en puissance du temps plus rapidement convergents que les développements classiques en séries de Poisson des longitudes moyennes.

Compte tenu des valeurs de  $n$  et  $n'$ , ces trois conditions nous ont conduit à choisir :

$$(5) \quad \mu = (n - n')t/46 = 6,8781t.$$

L'argument  $\mu$  ainsi défini a une période de 914 ans. La grande inégalité est reliée à  $\mu$  par :

$$(6) \quad 5(\bar{\lambda}' - \lambda'_0) - 2(\bar{\lambda} - \lambda_0) = \mu + 0,235562t,$$

Dans les formules 5 et 6 le coefficient du temps  $t$  est exprimé en radian par millier d'années.

#### *Déroulement des itérations.*

Nous avons intégré les équations par :

- analyse harmonique en fonction de  $\mu$ . Nous notons  $H1$  la solution obtenue par cette méthode.
- analyse harmonique en fonction de  $\bar{\lambda}$  et  $\bar{\lambda}'$  (solution, sous la forme classique,  $H2$ ).

Pour obtenir des solutions gardant une bonne précision sur 6000 ans nous avons poussé les développements (2) jusqu'en  $t^{10}$  et effectué une quarantaine d'itérations.

### 3. Résultats

La comparaison entre  $H1$  et  $H2$  montre que :

- *Les développements en puissance du temps sont beaucoup plus rapidement convergents dans  $H1$ .* 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  $H1$  et  $H2$ ; le tableau 2 concerne le nombre de termes des 2 solutions. Globalement, pour un développement en séries de Poisson en  $t^{10}$  la solution  $H1$  compte 2,5 fois moins de termes que la solution  $H2$ . Cette meilleure convergence résulte de la condition 2.3.c que nous avons imposée à notre argument  $\mu$ . Elle a une autre conséquence très intéressante :

- *La solution  $H1$  est beaucoup plus précise que  $H2$ .* Ceci est illustré par le tableau 3. Ce tableau donne, pour les 2 longitudes, les écarts entre les 2 solutions et une intégration numérique interne, sur 2000 ans et 6000 ans. La précision de  $H1$  est de l'ordre de celle obtenue par Simon et Bretagnon (1984) avec des développements en puissance du temps allant jusqu'en  $t^{20}$  et une solution contenant environ 4,5 fois plus de termes.

Le calcul des développements (2) jusqu'en  $t^{16}$  a permis d'obtenir avec une grande précision les termes séculaires des demi-grands axes qui ont servi à déterminer, par ajustement, les longues périodes des demi-grands axes de la théorie générale de Bretagnon et Simon (1990). Les écarts de la solution ainsi obtenue avec une intégration numérique ne dépassent pas  $0,01''$ , sur 6000 ans, pour la longitude de Saturne.

- *Changement de variable temporelle.* Le caractère plus compact de la solution peut être encore amélioré en utilisant une idée de J. Chapront (1988). On régularise les équations du mouvement en effectuant un changement de variable temporelle défini par  $dt = \Delta(v)dv$  où  $\Delta$  désigne la distance des deux planètes. On

peut alors remplacer  $\mu$  par un argument  $\nu = -\nu/46$ . Pour une précision identique, la solution représentée en fonction de  $\nu$  comporte environ 1,6 fois moins de termes que la solution  $H1$ .

#### 4. Extension aux 4 grosses planètes

L'extension de la méthode à l'ensemble des 4 grosses planètes a les objectifs suivants :

- améliorer les théories d'Uranus et Neptune de la solution TOP82;
- améliorer des petits diviseurs mal représentés dans les solutions de Jupiter et Saturne;
- améliorer la convergence des développements pour Jupiter et Saturne.

Le choix de l'argument de base est guidé par le désir d'obtenir une représentation compacte pour Jupiter et Saturne sans altérer la convergence des développements des perturbations d'Uranus et Neptune. Nous avons choisi:  $\mu = (n_5 - n_6) t/880 = 0,3595 t$ .  $\mu$  a une période de 17485 ans. Les deux grandes inégalités Jupiter-Saturne et Uranus-Neptune sont reliées à  $\mu$  par :

$$\begin{aligned} 5(\bar{\lambda}_6 - \lambda_{06}) - 2(\bar{\lambda}_5 - \lambda_{05}) &= 19\mu + 0,282408 t, \\ 2(\bar{\lambda}_8 - \lambda_{08}) - (\bar{\lambda}_7 - \lambda_{07}) &= 4\mu + 0,026031 t. \end{aligned}$$

où les indices 5,6,7,8, correspondent, respectivement, à Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune.

Notons qu'avec cet argument de base, les temps de calcul sont multipliés par un facteur inférieur à 10, par rapport aux perturbations mutuelles Jupiter-Saturne, ce qui reste très raisonnable.

Tableau 1. Développement en puissance du temps de la longitude moyenne de Saturne dans  $H1$  et  $H2$ : argument et amplitude du terme donnant la plus grosse contribution au bout de 6000 ans. L'unité est la seconde de degré.

	$H1$	$H2$
$S_0$	2908,34 ( $\mu$ )	2908,33 ( $2\bar{\lambda} - 5\bar{\lambda}'$ )
$S_1$	2894,06 ( $\mu$ )	6907,84 ( $2\bar{\lambda} - 5\bar{\lambda}'$ )
$S_2$	1713,33 ( $\mu$ )	8482,41 ( $2\bar{\lambda} - 5\bar{\lambda}'$ )
$S_3$	657,66 ( $\mu$ )	6954,11 ( $2\bar{\lambda} - 5\bar{\lambda}'$ )
$S_4$	249,49 ( $\mu$ )	4330,76 ( $2\bar{\lambda} - 5\bar{\lambda}'$ )
$S_5$	94,54 ( $\mu$ )	2208,02 ( $2\bar{\lambda} - 5\bar{\lambda}'$ )
$S_6$	23,22 ( $\mu$ )	981,04 ( $2\bar{\lambda} - 5\bar{\lambda}'$ )
$S_7$	8,80 ( $\mu$ )	400,29 ( $2\bar{\lambda} - 5\bar{\lambda}'$ )
$S_8$	5,06 ( $\mu$ )	226,23 ( $4\bar{\lambda} - 10\bar{\lambda}'$ )
$S_9$	2,45 ( $\mu$ )	116,08 ( $4\bar{\lambda} - 10\bar{\lambda}'$ )
$S_{10}$	1,11 ( $\mu$ )	55,91 ( $4\bar{\lambda} - 10\bar{\lambda}'$ )

Tableau 2. Longitudes moyennes de Jupiter ( $\lambda$ ) et Saturne ( $\lambda'$ ): nombre de termes des séries donnant des contributions supérieures à 0,001'' sur 6000 ans, dans  $H1$  et  $H2$ .

	$\lambda$		$\lambda'$		
	$H1$	$H2$	$H1$	$H2$	
$S_0$	196	194	$S_0$	229	229
$S_1$	205	239	$S_1$	244	287
...					
$S_{10}$	10	239	$S_{10}$	27	322
<i>Total</i>	1338	3128	<i>Total</i>	1741	3837

Tableau 3. Écarts maxima sur 2000 ans et 6000 ans pour la longitude moyenne de Jupiter ( $\Delta\lambda$ ) et la longitude moyenne de Saturne ( $\Delta\lambda'$ ) entre les solutions  $H1$  et  $H2$  et une intégration numérique interne. L'unité est la seconde de degré.

$\Delta t$	$\Delta\lambda$		$\Delta\lambda'$	
	$H1 - I$	$H2 - I$	$H1 - I$	$H2 - I$
2000	0,002	0,002	0,003	0,005
6000	0,104	2,961	0,185	7,276

### Bibliographie

- Bretagnon, P., Simon, J.L.: 1990, *Astron. Astrophys.* à paraître  
 Chapront, J.: 1988, communication privée  
 Chapront, J., Bretagnon, P., Mehl, M.: 1975, *Celes. Mech.* 5, 317  
 Duriez, L.: 1979, *Thèse, Lille*, p. 177  
 Joutel, F.: 1990 in *Journées Scientifiques du BDL*  
 Simon, J.L., Bretagnon, P.: 1984, *Astron. Astrophys.* 138, 169  
 Simon, J.L., Francou, G.: 1982, *Astron. Astrophys.* 114, 125  
 Simon, J.L., Joutel, F.: 1988, *Astron. Astrophys.* 205, 328

## DYNAMIQUE DES ASTEROIDES

J.L. Sagnier

RESUME . On présente deux travaux concernant l'étude du mouvement des petites planètes, actuellement menés de front. Le premier, a caractère pratique, a pour but la détermination d'éléments moyens au sens de la méthode de von Zeipel. Le second, plus théorique, se propose l'étude des régions de transition (circulation/libration) dans les résonances astéroïdales.

### 1 - DETERMINATION D'ELEMENTS MOYENS.

Les valeurs initiales des éléments osculateurs, fournies par [1], sont d'abord rapportées à un repère spatial convenable. Le plan de référence est le plan moyen de l'orbite de Jupiter et l'origine des longitudes est la direction du périhélie moyen de Jupiter. Les éléments moyens de la planète perturbatrice sont tirés de la théorie TOP82 [2, 3], et calculés pour l'époque des éléments osculateurs utilisés.

On se place dans le cadre du problème restreint des trois corps (Soleil-Jupiter-astéroïde), et pour des valeurs du rapport  $\alpha$  des demi-grands axes notablement différentes de l'unité (éliminant ainsi les planètes troyennes).

Les angles qui figurent dans la fonction perturbatrice (celle de Le Verrier [4] convient à ce problème) sont  $\lambda, \varpi, \Omega$  (pour l'astéroïde) et  $\lambda'$  (longitude moyenne de Jupiter). Dans le cas d'une résonance  $p:q$ , on préférera utiliser l'angle critique  $\theta = p\lambda' - q\lambda$  au lieu de  $\lambda$ .

On effectue une transformation de von Zeipel qui élimine  $\lambda$  et  $\lambda'$  hors résonance et  $\lambda'$  seulement dans le cas contraire, obtenant ainsi ce que nous entendons par éléments moyens.

Les calculs sont conduits en manipulant des séries de la forme :

$$\sum_q C_q(\alpha) \cdot F_q(e, e'; l, l') \cdot \sin^{q_1} \frac{l}{2} \cdot \exp i(q_2 \varpi + q_3 \Omega)$$

où  $l$  et  $l'$  sont les anomalies moyennes. Les coefficients  $C_q(\alpha)$ , associés aux coefficients de Laplace, sont calculés numériquement. De leur côté, les fonctions  $F_q$  sont représentées sous la forme semi-analytique :

$$F_q(e, e'; l, l') = \sum_r e^{r_1} \cdot \varphi_r(e, e') \cdot \exp i(r_2 l + r_3 l')$$

où les  $\varphi_r$ , d'ordre zéro par rapport à  $e$ , sont calculés numériquement.

Sur cette base, on calculera la fonction perturbatrice, celles de ses dérivées partielles jugées utiles (donc les dérivées des  $C_q$  par rapport à  $\alpha$  et des  $F_q$  par rapport à  $e$ ),

la fonction génératrice de la transformation de von Zeipel, et enfin l'expression des éléments moyens en fonction des éléments osculateurs.

Ces opérations nécessitent la mise en oeuvre de sous programmes de traitement de séries ayant la forme de  $F_q$ . Ces sous programmes sont en cours de mise au point, avec l'aide de Ch. Ruatti.

## 2 - REGION DE TRANSITION DANS LES RESONANCES ASTEROIDALES.

On se place dans le cas d'une résonance  $p:q$  et on suppose encore que l'angle rapide  $\lambda'$  est éliminé, mais non la combinaison critique  $\theta$  ni les angles lents  $\varpi$  et  $\Omega$ . Si on associe aux angles  $\theta, \varpi, \Omega$  des variables canoniquement conjuguées  $I, J, K$ , le hamiltonien a la forme :

$$F(I, J, K; \theta, \varpi, \Omega) = F_0(I) + \frac{\epsilon\mu}{a'} R_L(I, J, K; -, \varpi, \Omega) + \frac{\epsilon\mu}{a'} R_K(I, J, K; \theta, \varpi, \Omega)$$

où  $R_L$  regroupe les termes de longue période de la fonction perturbatrice et  $R_K$  ses termes critiques.

Le terme principal du hamiltonien est :

$$F_0(I) = \frac{\mu}{2q^2 I^2} - p n' I$$

et on définit la constante  $I_r$  (valeur de  $I$  dans la résonance exacte) par la relation :

$$F_0'(I_r) = 0$$

On appelle transformation de Delaunay étendue [5] une transformation canonique :

$$(I, J, K; \theta, \varpi, \Omega) \rightarrow (\zeta, J^*, K^*; \tau, \varpi^*, \Omega^*)$$

dont la fonction génératrice a la forme :

$$S(\zeta, J^*, K^*; \theta, \varpi, \Omega) = I_r \theta + J^* \varpi + K^* \Omega + \sqrt{\epsilon} \cdot S_{1/2}(\zeta, J^*, K^*; \theta, \varpi, \Omega)$$

et telle que  $\zeta$  (niveau d'énergie) se réduise à une constante et  $\tau$  à une fonction affine du temps. Les variables  $(J^*, K^*; \varpi^*, \Omega^*)$  vérifient alors un système canonique à deux degrés de liberté, dont le hamiltonien est indépendant de l'angle critique, à des termes d'ordre  $\epsilon^{3/2}$  près.

La discussion de cette transformation met en évidence deux fonctions  $P_1(J^*, K^*; \varpi, \Omega)$  et  $P_2(J^*, K^*; \varpi, \Omega)$  telles que :

- si  $\zeta > P_2$ , les solutions sont complexes et sans signification physique;
- si  $P_2 > \zeta > P_1$ , la variation de  $\theta$  est limitée à un intervalle (libration);
- si  $P_1 > \zeta$ , la variation de  $\theta$  est libre (circulation).

Dans ces conditions, l'équation :

$$\zeta - P_1 (J^*, K^*; \varpi, \Omega) = 0$$

définit dans l'espace des phases une variété de dimension 5 qui sépare les régions de libration et de circulation : la variété de transition [6, 7, 8]. Nous nous intéressons aux trajectoires de transition. Ce sont celles qui ont un point initial dans la variété de transition et, de ce fait, passent de la libration à la circulation ou vice versa.

On a étudié en particulier [9], dans le cas plan, et pour les résonances 2:1, 3:1 et 4:1, l' "angle d'incidence" des trajectoires traversant la variété de transition. On a ainsi pu distinguer les régions "circulation  $\rightarrow$  libration" des régions "libration  $\rightarrow$  circulation". On a également mis en évidence de très petites régions où la traversée de la variété de transition s'effectue presque normalement et on se propose d'étudier spécialement les trajectoires qui passent par ces régions.

#### BIBLIOGRAPHIE

- [1] Ephemerides of minor planets, ITA, Leningrad (publication périodique).
- [2] Simon, J.-L., 1983, Astron. & Astrophys., 120-197.
- [3] Connaissance des Temps - Ephémérides astronomiques - Bureau des Longitudes - Paris (publication périodique).
- [4] Le Verrier, U. J. J., 1855, Ann. Obs. Paris, 1.
- [5] Ferraz Mello, S., 1978, Une extension de la méthode de Delaunay. C. R. Acad. Sc., Paris, ser A, 286.
- [6] Sagnier J.-L., 1985, Regiao de transição na Ressonância asteroidal 3:1, 3<sup>o</sup> Simposio de Astronomia e Matematica aplicada, Rio Claro, Brésil.
- [7] Sagnier J.-L., 1986, Variedade de transição na Ressonância asteroidal 3:1, 3<sup>o</sup> Coloquio Brasileiro de Dinâmica Orbital, Univ. de Sao Paulo.
- [8] Sagnier J.-L. et al., 1986, Ressonância asteroidal 3:1, 4<sup>a</sup> Reunion regional Latinoamericana de Astronomia (UAI).
- [9] Sagnier J.-L., 1990, Région de transition dans les résonances astéroïdales, 2<sup>ème</sup> Table ronde de planétologie dynamique, Vars (à paraître).

# INTEGRATEUR NUMERIQUE D'UNE SONDE

## A TRAVERS

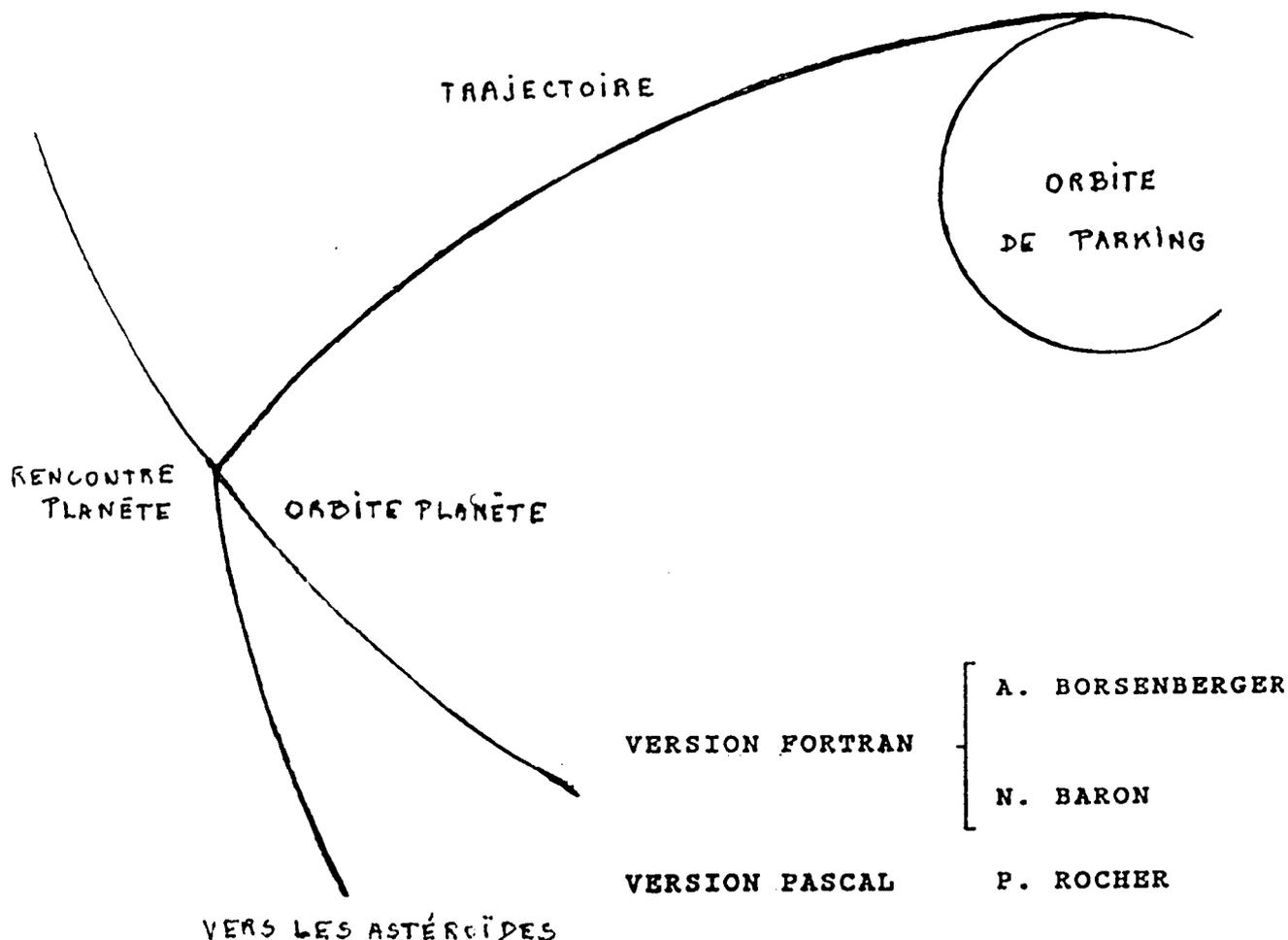
### LE SYSTEME SOLAIRE

N. Baron

Cette étude - effectuée dans le cadre d'un contrat avec le CNES - a pour but de préparer l'optimisation de trajectoires à travers le système solaire de façon à commander les manoeuvres d'une sonde lors du départ de la Terre, du survol d'une planète (arrivée, départ) puis du survol de petits corps. Le calcul des trajectoires se fait par l'intégration numérique.

Le programme a été réalisé simultanément par A. Bec-Borsenberger et N. Baron en FORTRAN et P. Rocher en PASCAL.

Il réalise le calcul de l'éphéméride de la trajectoire d'une sonde partant d'une orbite de parking vers une planète; à l'approche de cette planète, il donne la possibilité de modifier la trajectoire, par des poussées instantanées ou longues, afin de passer le plus près possible de la planète choisie; après le passage, il permet de redonner des impulsions pour corriger une fois encore la trajectoire de la sonde et repartir vers un autre corps du Système Solaire.



## CARACTERISTIQUES ET POSSIBILITES DU PROGRAMME FORTRAN

Sous forme d'un bulletin publié à l'écran, on introduit les conditions initiales de la sonde à une certaine époque et divers choix possibles :

- la position et la vitesse soit en UA et en UA/jour soit en km et en km/seconde à un instant donné,
- le repère peut être écliptique ou équatorial,
- le centre du repère est soit une planète soit le Soleil,
- le centre du mouvement est donné au départ mais peut être changé en cours de trajectoire,
- si besoin est, on donne le centre du corps du swing-by. En effet, l'étude de la trajectoire de la sonde peut être faite sans l'étude d'un passage proche.

Il est également possible de donner des positions approchées du point par laquelle on voudrait faire passer la sonde.

Le pas d'intégration peut être différent selon l'endroit de la trajectoire où l'on se trouve :

- à grands pas de la date des conditions initiales à la date de calcul des éphémérides donnée dans le bulletin,
- à plus petits pas peu avant le passage proche,
- et à un tout petit pas aux alentours du passage proche.

Dans le calcul de la fonction perturbatrice, on peut introduire soit une ou plusieurs planètes;

- dans le cas du système Terre-Lune suivant la position de la sonde par rapport à ce dernier, on peut prendre soit le système soit les deux corps séparément,
- introduction possible du potentiel de Mars, le ss-prg a été fourni par M. Chapront.
- introduction possible de la pression solaire,
- introduction de poussées instantanées ou longues avec les dates de début et de fin de poussées données dans le bulletin;

Lors du calcul d'une trajectoire, on peut faire le calcul des dérivées partielles et de la matrice de covariance, et à l'aide de cette matrice, le programme calcule automatiquement la correction sur les conditions initiales pour modifier la trajectoire de façon à la rapprocher du point par lequel on veut la faire passer.

Ce bulletin peut aussi être modifié en cours de trajectoire et publié à l'écran.

CE BULLETIN EST SORTI A L'ECRAN ainsi :

EPOQUE DES CONDITIONS INITIALES : 2450825.6375000000000000  
CENTRE DU REPERE DES CONDITIONS INITIALES : SOLEIL  
CENTRE DU MOUVEMENT DE L'OBJET : SOLEIL  
ON RECHERCHE LE MINIMUM DE DISTANCE A LA PLANETE MARS  
ON CALCULE LES DERIVEES PARTIELLES  
Avec un stockage et une impression tous les 2 pas  
CONDITIONS INITIALES POSITIONS ET VITESSES  
données en km et en km par jour  
dans un repère écliptique  
1.943493822543060E+008 -7.383374356144740E+007 -6109466.614721910000000  
3.791892610560340 23.687239706250000 -4.289686207585500E+001  
POSITION CHERCHEE AU PASSAGE AU MINIMUM en équatorial  
-400.0000000000000000 -2800.0000000000000000 -3500.0000000000000000  
Eventuellement, IMPRESSION DES EPHEMERIDES tous les 2 pas  
3 planète(s) exclue(s) de la fonction perturbatrice  
planète MERCURE exclue  
planète NEPTUNE exclue  
planète PLUTON exclue  
2 poussée(s), dont 1 Poussée(s) Longue(s)  
AUX DATES :  
2450828.13750 : 1, poussée instantanée;  
2450828.15750 : 2, début de Poussée Longue (PL);  
2450828.31750 : 3, fin de Poussée Longue (PL).

## RÉSULTATS

A LA DATE T=2450828.566568

DISTANCE MINIMALE : .0000280207506155 UA  
ou .4191844607885431D+04 km,  
ET MODULE DU VECTEUR VITESSE : .0043122445599844 UA/jour  
ou .7466465290425387D+01 km/s

POSITION EQUATORIALE J2000 CENTREE SUR: MARS

X(1)= -.1936466503644051D-05 UA ou -.2896912642714973D+03 km  
X(2)= -.1917159574972705D-04 UA ou -.2868029888660219D+04 km  
X(3)= -.2034361027318884D-04 UA ou -.3043360764979169D+04 km

VITESSE EQUATORIALE J2000 CENTREE SUR MARS

X(4)= -.4292069582726307D-02 UA/jour ou -.7431533188282921D+01 km/s  
X(5)= .4161939430655206D-03 UA/jour ou .7206218447859162D+00 km/s  
X(6)= .1935055312502876D-04 UA/jour ou .3350464734752485D-01 km/s

### Les astéroïdes.

On utilise les conditions initiales issues des éléments des petites planètes publiés par Y.V. Batrakov et V.A. Shor de l'Institut d'Astronomie Théorique de Léningrad. Les programmes de calcul (intégration numérique et production d'éphémérides) existent en deux versions. Une version en PL1 sur le CIRCE et une version en Turbo Pascal sur micro IBM PC. La version sur le CIRCE sert surtout pour les gros calculs (plusieurs dizaines d'astéroïdes à la fois). La version IBM PC est plutôt orientée vers la production rapide d'éphémérides pour un corps particulier. Sur le CIRCE on a également la possibilité d'améliorer les conditions initiales dans la mesure où l'on dispose d'observations. Ces programmes permettent tous les ans de publier une Note Scientifique et Technique du Bureau des Longitudes contenant les éphémérides tabulées de 133 astéroïdes. Les éphémérides publiées dans l'Annuaire sont extraites de cette note .

### Les comètes.

Les conditions initiales peuvent être prises dans les Minor Planet Circulars, ou être calculées grâce aux observations. Pour les comètes non périodiques on utilise en général les éléments des MPC. Pour les comètes périodiques on améliore les conditions initiales à l'aide des observations. Cela nécessite la création et la mise à jour de fichiers d'observations. Ce travail est effectué par Mme Raoult.

L'amélioration des conditions initiales se fait en ajustant l'orbite à l'aide des observations par la méthode des moindres carrés. Nous rencontrons ici des problèmes typiques des comètes : l'introduction de forces non gravitationnelles, la mauvaise qualité astrométrique des observations (le centre de masse est différent du centre optique, images diffuses), la mauvaise répartition des observations sur l'orbite (voisinage du périhélie) et pour certaines comètes le très petit nombre d'observations.

Nous publions chaque année des éphémérides de redécouverte pour toutes les comètes périodiques passant au périhélie dans l'année ( Note Scientifique et Technique du BDL et Annuaire). Cette année j'ai été aidé dans ce travail par Mme Satre.

Mes objectifs pour les années à venir sont les suivants :

- Créer une banque de données regroupant les éléments publiés dans les MPC et les éléments déterminés au Bureau des Longitudes.
- Rattraper un certain retard pris dans l'amélioration des éléments des comètes périodiques de manière à pouvoir les publier dans les MPC. Cela nécessite une saisie plus régulière des observations et une aide permanente pour exploiter les différents programmes.

### Trajectoire d'une sonde dans le système solaire.

Ce travail a été fait à la demande du CNES. Pour pouvoir vérifier le bon fonctionnement des différents programmes le travail a été effectué indépendamment par deux équipes distinctes "P.Rocher" et "A. Borsenberger, N. Baron".

#### *Caractéristiques du problème.*

On tient compte des perturbations dues à l'ensemble des planètes du système Solaire. Les positions des planètes, de la Lune et du Soleil sont calculées à l'aide des éphémérides BDL82.(pour

LES PERTURBATIONS DUES AUX PLANETES SONT CALCULEES AVEC LE BARYCENTRE TERRE-LUNE

INSTANT FINAL = 2450828.637500

CONDITIONS FINALES CENTREES SUR : SOLEIL CENTRE DU MOUVEMENT  
POSITION EQUATORIALE J2000 CENTREE SUR : SOLEIL

X(1)= .1305041439292383D+01 UA ou .1952314195798748D+09 km  
X(2)= -.3984067204623589D+00 UA ou -.5960079677485431D+08 km  
X(3)= -.2180339106657004D+00 UA ou -.3261740862335906D+08 km

VITESSE EQUATORIALE J2000 CENTREE SUR SOLEIL

X(4)= .1702617663097318D-02 UA/jour ou .2948008979441393D+01 km/s  
X(5)= .1284775033105774D-01 UA/jour ou .2224532504419019D+02 km/s  
X(6)= .5308131799564574D-02 UA/jour ou .9190801052015361D+01 km/s

CONDITIONS FINALES CENTREES SUR : SOLEIL CENTRE DES CONDITIONS INITIALES  
POSITION ECLIPTIQUE J2000 CENTREE SUR : SOLEIL

X(1)= .1305041439292383D+01 UA ou .1952314195798748D+09 km  
X(2)= -.4522599283133404D+00 UA ou -.6765712196202841D+08 km  
X(3)= -.4156510978889651D-01 UA ou -.6218051890735067D+07 km

VITESSE ECLIPTIQUE J2000 CENTREE SUR SOLEIL

X(4)= .1702617663097318D-02 UA/jour ou .2948008979441393D+01 km/s  
X(5)= .1389903403723141D-01 UA/jour ou .2406557739614954D+02 km/s  
X(6)= -.2404258776119469D-03 UA/jour ou -.4162870275882863D+00 km/s

CONDITIONS FINALES CENTREES SUR : MARS passage proche  
POSITION EQUATORIALE J2000 CENTREE SUR : MARS

X(1)= -.1417350235377590D-03 UA ou -.2120325762564861D+05 km  
X(2)= -.5282454998447594D-03 UA ou -.7902440161386134D+05 km  
X(3)= -.2488092978825962D-03 UA ou -.3722134099943190D+05 km

VITESSE EQUATORIALE J2000 CENTREE SUR MARS

X(4)= -.3410690794813897D-02 UA/jour ou -.5905463867277384D+01 km/s  
X(5)= -.3121092867275181D-03 UA/jour ou -.5404037558062035D+00 km/s  
X(6)= -.5896102936767331D-03 UA/jour ou -.1020884769260576D+01 km/s

## TRAJECTOGRAPHIE PLANÉTAIRE

P. Rocher

Le but de ce travail est le calcul et l'édition des éphémérides des petits corps du système solaire. Les petits corps du système solaire sont les astéroïdes, les comètes et éventuellement des sondes spatiales. Les méthodes de calcul des orbites de ces corps ont de nombreux points communs.

### *Les équations du mouvement.*

Les équations du mouvement sont écrites en coordonnées cartésiennes équatoriales. On tient compte des perturbations dues à l'ensemble des planètes du système solaire. Pour certaines comètes on ajoute des forces non gravitationnelles (dégazage du noyau au voisinage du Soleil). Pour les sondes spatiales d'autres forces peuvent être introduites.

### *La résolution des équations du mouvement.*

Les équations différentielles sont résolues par des méthodes d'intégration numérique. Il existe de nombreuses méthodes d'intégration numérique; il convient d'en choisir une bien adaptée à notre problème. La méthode que nous avons choisie est la méthode de Gragg-Bulirsch-Stoer. Elle présente les avantages suivants : une bonne stabilité numérique (notamment dans le cas de passage proche avec une planète), la possibilité d'utiliser un pas d'intégration variable et surtout le fait que l'on peut utiliser un pas très grand (1/6 de la période). Cette méthode est du type prédicteur-correcteur.

### *Les éphémérides des planètes du système solaire.*

Pour le calcul de la fonction perturbatrice on doit utiliser des éphémérides des planètes du système solaire. On utilise deux types d'éphémérides, les éphémérides du JPL DE102 si on intègre dans le repère 1950.0 ou les éphémérides du Bureau des Longitudes BDL82 si on intègre dans le repère J2000.0. Ces éphémérides permettent un calcul rapide des positions planétaires.

### *Les conditions initiales.*

Pour le choix des conditions initiales deux solutions s'offrent à nous : soit on utilise les conditions initiales déjà existantes, soit on les calcule nous-mêmes.

les planètes et le Soleil les solutions VSOP82 et TOP82 de P. Bretagnon et J.L. Simon, pour la Lune la solution ELP2000/82 de M. Chapront-Touzé et J. Chapront).

On tient compte du potentiel de Mars lorsque cela est nécessaire. (Formulaire et programme ont été fournis par M. Chapront-Touzé. ESAPHO, a semi-analytical theory for the orbital motion of PHOBOS). Potentiel de Mars à l'ordre 9.

*La version sur IBM PC.*

La version sur IBM PC est écrite en Turbo Pascal et utilise un gestionnaire d'écran Turbo Screen 3. Les deux versions FORTRAN et Pascal permettent de faire les mêmes choses, mais sont très complémentaires. Ainsi les modules de la version Fortran peuvent être facilement incorporés à d'autres programmes de calcul, alors que la version Turbo Pascal est une version fermée. Elle est peu ou pas modifiable par l'utilisateur. La version Fortran est une version orientée vers des traitements en Batch alors que la version PC est orientée vers des traitements en mode conversationnel, la totalité des entrées-sorties et la gestion des bulletins de vol se font par l'intermédiaire de menus déroulants.

Pour la version sur PC on a atteint les limites de l'ordinateur, la taille mémoire du programme exécutable approche les 640k. On est contraint d'utiliser le compilateur en ligne et le débogueur intégré devient inutilisable.

*Comparaison des deux produits.*

Les résultats des calculs sont identiques à la précision souhaitée. Les calculs des positions des planètes avec les éphémérides fournies par G. Francou donnent des résultats identiques sur les différents types d'ordinateurs utilisés. Dans la version en Turbo Pascal ces programmes ont été très légèrement modifiés de manière à pouvoir utiliser l'intégrateur sans effectuer trop de lecture disque.

Pour le calcul du minimum de distance, on a essayé deux méthodes :

- On sauvegarde sur fichier les positions de la sonde puis on calcule le minimum en interpolant les positions. (Nombreux problèmes liés aux pas de calcul de la trajectoire et à la précision dans les interpolations).
- On recherche directement le minimum de distance au cours de l'intégration.

*Temps de calcul.*

Lorsque l'on tient compte du potentiel de Mars et que l'on calcule le système des équations aux dérivées partielles les temps de calcul deviennent un peu long sur des machines du type PC AT (80286). Ce n'était pas le cas lorsque l'on intégrait une comète ou un astéroïde.

### **Sous-produits du projet.**

*Éphémérides sur PC en mode conversationnel.*

Pour calculer les positions des planètes perturbatrices on a transféré les fichiers BDL82 du CIRCE sur PC (période allant de fin 1987 au début de 2011). On a donc construit autour de ces éphémérides un programme conversationnel qui permet de calculer avec la précision de BDL82 (CIRCE) les positions des planètes, de la Lune, du Soleil et des astéroïdes dans plusieurs systèmes de coordonnées.

Les choix sont les suivants :

Repère de base :

- 1- Coordonnées géométriques J2000.0
- 2- Coordonnées astrométriques J2000.0
- 3- Coordonnées astrométriques 1950.0
- 4- Coordonnées moyennes de la date.
- 5- Coordonnées vraies.
- 6- Coordonnées apparentes.

Système de coordonnées :

- 1- Coordonnées équatoriales.
- 2- Coordonnées écliptiques.
- 3- Coordonnées horaires.
- 4- Coordonnées horizontales.

De plus ces coordonnées sont géocentriques ou topocentriques.

## OBSERVATIONS DES PETITES PLANETES PAR HIPPARCOS

A. Bec-Borsenberger

### *Programme Hipparcos*

Ce programme a pour but l'observation de 110000 étoiles sélectionnées de façon à réaliser un catalogue de très haute précision donnant les positions, parallaxes et mouvements propres de ces étoiles. Un second catalogue moins précis mais plus complet (Tycho) contiendra les données astrométriques et photométriques d'environ 400000 étoiles. Le satellite est conçu pour tourner lentement sur lui-même, en effectuant un tour toutes les deux heures, son axe tournant autour de la direction du Soleil en faisant un angle constant d'environ 43 degrés. Les deux champs de visée du télescope du satellite sont eux-mêmes séparés d'un angle constant d'environ 58 degrés. De cette manière, le télescope balaie entièrement la sphère céleste.

### *Groupes engagés dans Hipparcos*

Ma partie scientifique du projet a été réalisée au sein de divers consortiums regroupant chacun plusieurs laboratoires ou instituts européens: INCA, pour la constitution du catalogue principal d'entrée des données; TDAC, pour celle du catalogue photométrique d'entrée des données; FAST et NDAC, pour l'analyse des données d' Hipparcos.

L'essentiel du travail que j'ai effectué pour Hipparcos a été réalisé pour le consortium INCA: parmi les propositions de programme d'observation pour Hipparcos soumises à l'ESA, plusieurs concernent des objets particuliers comme les étoiles doubles, les radio-étoiles, les objets du système solaire: petites planètes et satellites naturels de planètes. Les 8 propositions relatives aux petites planètes concernent soit la détermination de l'équinoxe dynamique et de la rotation du système, soit des améliorations des données physiques des planètes ou des déterminations de binarité. Ces propositions concernent ensemble 63 petites planètes. En 1982, le professeur Fricke et C. Turon (responsable du consortium INCA) m'ont demandé de prendre la responsabilité du groupe chargé dans le consortium INCA des missions de ce dernier concernant les objets du système solaire, à savoir: fournir les éphémérides de position avec une précision de 1", et celle de magnitude avec une précision de 0.5 magnitude, ce qui m'a fait proposer une campagne d'observations au sol, campagne dont j'ai assuré et assure encore le suivi.

### *Observations des petites planètes.*

Dans le cadre du projet Hipparcos, les 63 petites planètes ont été mises en observation aux méridiens automatiques des observatoires de Bordeaux dès 1983 et de La Palma à partir de 1984, ainsi qu'à l'astrogaphe de San Fernando. A ces observations, sont venus s'ajouter celles faites à Barcelone (Fabra obs.) depuis 1979, une bonne partie des petites planètes Hipparcos y étant déjà observée pour un autre programme. Au total, plus de 12000 observations ont actuellement été faites pour ce programme. Pour les observations plus anciennes, j'ai demandé à B. Marsden (minor planet center) la bande magnétique sur laquelle sont réunies les observations des petites planètes.

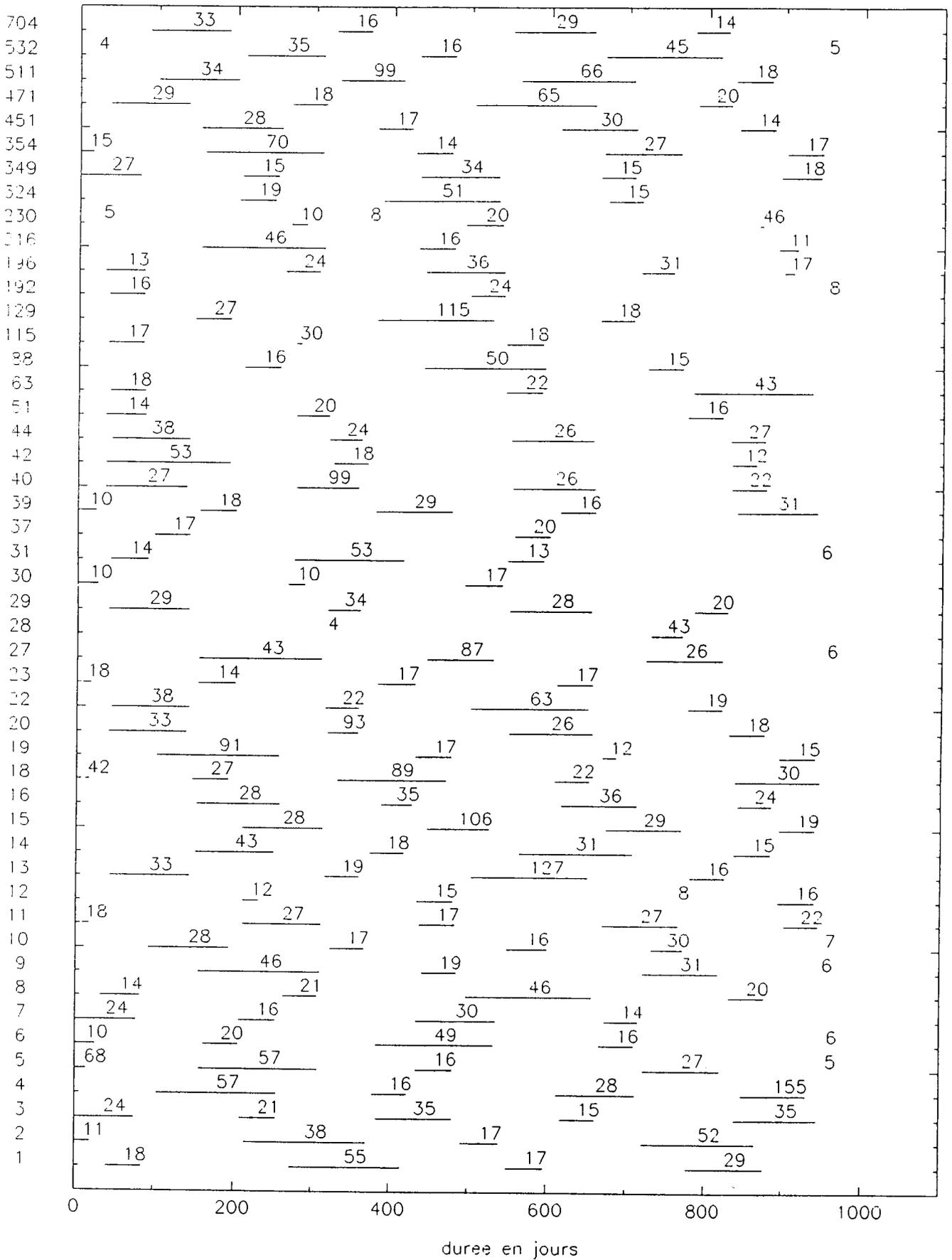
### *Amélioration des éphémérides des petites planètes*

J'ai calculé les éphémérides des petites planètes par intégration numérique (méthode de Gragg, Bulirsh et Stoer, programme fortran de G. Balmino) à partir des éléments orbitaux publiés par l'Institut d'Astronomie Théorique de Leningrad. Ces éléments sont ceux de 1986, (époque 1986 juin 19.0) et sont relatifs à l'écliptique et à l'équinoxe 1950.0. J'ai ensuite comparé les positions observées avec les positions calculées à partir de ces éphémérides. Les écarts entre ces positions (résidus ou O-C) pouvaient aller jusqu'à 7" pour certaines petites planètes. J'ai calculé alors les corrections aux éléments orbitaux en résolvant, par la méthode des moindres carrés, le système des équations reliant les variations des constantes d'intégration aux O-C, après avoir éliminé les équations correspondant aux observations pour lesquelles les résidus, étaient supérieurs à 10" (premier tri), puis à  $3\sigma$  (deuxième tri); les dérivées partielles par rapport aux éléments orbitaux, figurant dans ces équations, ont été calculées par intégration numérique en même temps que les équations du mouvement. Les éphémérides des planètes utilisées dans ces intégrations sont les éphémérides DE102 du JPL. Pour l'ensemble des 63 petites planètes, les O-C ont ainsi été ramenés à des valeurs en moyenne inférieures à 1", avec des r.m.s. compris entre 0.6" et 1.2", suivant les planètes. J'ai ensuite effectué le changement de repère 1950.0 à J2000 et recalculé, dans ce nouveau repère, les éphémérides à l'aide du dernier jeu d'éléments orbitaux améliorés que j'avais déterminé. J'ai fait alors des ajustements successifs des conditions initiales en introduisant les observations de La Palma pour 1986, puis pour 1987 et celles de Bordeaux pour 1988 au fur et à mesure que je les recevais. La comparaison de la dernière solution avec les observations méridiennes de Bordeaux et de La Palma montre que les r.m.s. sont inférieurs à 0.5" sauf pour la petite planète 171-Ophelia pour lesquelles les r.m.s. sont de 0.57" en ascension droite et de 0.64" en déclinaison. Les éphémérides jusqu'en 1989 donne donc les positions avec précision suffisante. Qu'en est-il de l'extrapolation de cette éphéméride? Nous avons pu constater, aussi bien dans les comparaisons faites à Barcelone qu'au Bureau des Longitudes, que les éphémérides prévisionnelles conservaient au moins pendant un an une précision suffisante. Il a donc été convenu pour conserver cette précision tout au long de la campagne Hipparcos de continuer à observer du sol ces satellites de façon à "recaler" les éphémérides tous les ans si cela s'avère nécessaire.

### *Fenêtres d'observabilité*

A partir des éphémérides ainsi ajustées, une simulation de la campagne d'observation par Hipparcos a été réalisée par M. Chareton, campagne nominale commençant le 1er avril 1989 et s'étendant sur 1100 jours et a permis de déterminer les fenêtres d'observabilité: à savoir le nombre d'apparitions de chaque petite planète, dans l'un ou l'autre champ d'observation d'Hipparcos, pour une magnitude Hipparcos inférieure à 12.5, et la période pour laquelle la planète est visible. C'est à l'aide de ces résultats qu'avec J. Kovalevsky, B. Morando et L. Lindegren, nous avons fait la sélection finale des petites planètes devant être observées par Hipparcos: nous avons pris en compte le nombre de transits et la dégradation probable estimée de la transparence de l'optique au cours de la mission. Nous avons ainsi éliminé quinze petites planètes de la liste originale.

petites planetes



OBSERVATIONS

FAITES A BORDEAUX (1984 → 1988)

ET A LA PALMA (1984 → 1987)

Petite Planète	Nombre d'observations		Petite Planète	Nombre d'observations	
	Bordeaux	La Palma		Bordeaux	La Palma
1	53	183	42	33	89
2	60	197	44	47	162
3	54	153	45	37	75
4	76	135	46	28	80
5	35	82	49	20	28
6	32	168	51	38	154
7	28	191	52	66	123
8	31	195	63	55	75
9	102	117	65	16	44
10	56	170	68	23	118
11	92	127	88	43	122
12	39	94	89	19	70
13	32	147	97	33	66
14	93	115	115	36	61
15	38	158	129	45	89
16	37	138	171	6	20
17	59	72	192	45	100
18	86	154	196	58	105
19	50	105	216	8	21
20	43	157	230	70	85
21	54	65	324	26	106
22	39	91	337	21	57
23	30	108	349	69	150
24	26	63	354	51	62
27	80	100	423	23	87
28	70	97	433	1	
29	50	164	451	29	61
30	56	86	511	28	98
31	18	67	532	35	71
37	33	66	704	32	72
39	42	124	471	42	97
40	24	164			

TABLEAU III  
 MINOR PLANET CENTER  
 Observations  
 (1930 → 1983)

M.P.	N.O.	M.P.	N.O.	M.P.	N.O.
1	4 500	22	307	88	225
2	5 033	23	196	89	223
3	4 486	24	368	97	116
4	5 011	27	693	115	266
5	439	28	246	129	263
6	3 164	29	358	171	97
7	2 725	30	279	192	268
8	557	31	272	196	228
9	461	37	202	216	678
10	759	39	2 438	230	269
11	2 216	40	2 032	324	250
12	753	42	202	337	131
13	219	44	390	349	304
14	588	45	210	354	390
15	447	46	190	423	117
16	524	49	238	433	1 427
17	353	51	2 757	451	171
18	2 324	52	451	471	215
19	407	63	294	511	320
20	426	65	330	532	910
21	321	68	204	704	455

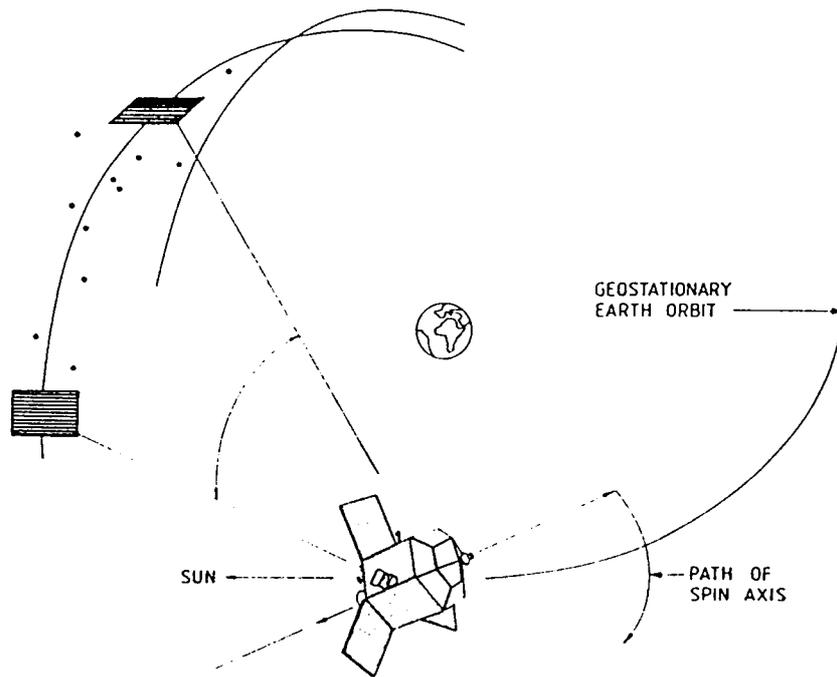
SAN FERNANDO

1022 Observations made by the observatory of Marina, L. Quijano.

1983 - 1984 - 1985

(astrograph Gautier)

High Precision PARallax Collecting Satellite



Schematic representation of the revolving scanning law.

Petites planètes du programme Hipparcos

No.	Name	No.	Name	No.	Name
1	Ceres	22	Kalliope	88	Thisbe
2	Pallas	23	Thalia	*89	Julia
3	Juno	*24	Themis	*97	Klotho
4	Vesta	27	Euterpe	115	Thyra
5	Astraea	28	Bellona	129	Antigone
6	Hebe	29	Amphitrite	*171	Ophelia
7	Iris	30	Urania	192	Nausikaa
8	Flora	31	Euphrosyne	196	Philomela
9	Metis	37	Fides	216	Kleopatra
10	Hygiea	39	Laetitia	230	Athamantis
11	Parthenope	40	Harmonia	324	Bamberga
12	Victoria	42	Isis	*337	Devosa
13	Egeria	44	Nysa	349	Dembowska
14	Irene	*45	Eugenia	354	Eleonora
15	Eunomia	*46	Hestia	*423	Diotima
16	Psyche	*49	Pales	*433	Eros
*17	Thetis	51	Nemausa	451	Patientia
18	Melpomene	*52	Europa	471	Papagena
19	Fortuna	63	Ausonia	511	Dauida
20	Massalia	*65	Cybele	532	Herculina
*21	Lutetia	*68	Leto	704	Interamnia

Les petites planètes marquées d'un astérisque sont celles supprimées de la sélection finale.

## REDUCTION DES OBSERVATIONS DES PETITES PLANETES PAR HIPPARCOS

B. Morando

Une quarantaine de petites planètes doivent être observées par Hipparcos. Le choix a été guidé par le fait que ces objets doivent être plus brillants que la magnitude 12, environ, qui est la magnitude limite atteinte par Hipparcos. Par ailleurs le diamètre apparent doit être inférieur à la seconde de degré pour qu'on obtienne un modulation par la grille qui soit exploitable; c'est le cas pour tous les astéroïdes (mais non pas pour les grosses planètes qui ont donc été exclues du programme.

Le but principal des observations de petites planètes par Hipparcos est de rattacher le système de référence dynamique, défini par le mouvement des corps du système solaire dans un système galiléen dont l'origine est au barycentre, au système de référence défini par le catalogue Hipparcos.

### Principe de la réduction

Les données d'observation sont, pour des instants donnés, les abscisses  $\lambda$  le long d'un grand cercle de référence (GCR) sur la sphère céleste dont on donne les coordonnées écliptiques du pôle dans le système J2000.0. Un grand nombre d'observations sur différents GCR seront obtenues au cours de la mission. Si  $\beta$  est la latitude de la petite planète considérée et  $l$  et  $b$  ses coordonnées écliptiques J2000.0 et si l'on pose :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \lambda \\ \cos \beta \sin \lambda \\ \sin \beta \end{bmatrix} ; \quad \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos b \cos l \\ \cos b \sin l \\ \sin b \end{bmatrix}$$

on a la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

où  $R$  est une matrice de rotation fonction connue des coordonnées du pôle du GCR.

Les coordonnées calculées sont des fonctions des conditions initiales  $q_i$  et du temps  $t$ , les coordonnées observées sont fonctions, de plus, des corrections  $dq_i$  aux conditions initiales.

$$x_c = x(q_i, t) \quad ; \quad x_o = x(q_i + dq_i, t)$$

.....

En linéarisant ces équations et en passant au système défini par le GCR on obtient les équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial q_i} \\ \frac{\partial y}{\partial q_i} \\ \frac{\partial z}{\partial q_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_i dq_i \\ B_i dq_i \\ C_i dq_i \end{bmatrix}$$

qui, exprimées en fonction de  $\lambda$  et  $\beta$  donnent:

$$- \sin \beta \cos \lambda d\beta - \cos \beta \sin \lambda d\lambda = A_i dq_i$$

$$- \sin \beta \sin \lambda d\beta + \cos \beta \cos \lambda d\lambda = B_i dq_i$$

$$\cos \beta d\beta = C_i dq_i$$

(Bien entendu les seconds membres doivent être sommés sur  $i$ .)

Hipparcos ne donne que des corrections  $d\lambda$  à la coordonnée  $\lambda$ ; il faut donc éliminer  $d\beta$  et l'on obtient l'équation fondamentale du problème :

$$\cos \beta d\lambda = (B_i \cos \lambda - A_i \sin \lambda) dq_i$$

qui permet d'obtenir avec toute la précision des observations d'Hipparcos les éléments de l'orbite de la petite planète considérée. L'ensemble des données recueillies sur les petites planètes du programme permettra ensuite de trouver la position de l'écliptique et de l'équinoxe dynamiques par rapport au système Hipparcos.

### **Ecart entre le photocentre et le centre**

Les petites planètes du programme sont des corps de forme plus ou moins proche d'ellipsoïdes à trois axes inégaux tournant autour de l'un d'eux; elles sont observées avec une certaine phase et les propriétés de la surface sont mal connues. Il en résulte qu'on observe un photocentre qui ne coïncide pas avec le centre de la petite planète, il s'en faut d'un angle qui peut être beaucoup plus grand que la précision des mesures. Plus précisément la courbe de modulation d'une petite planète donnée par la grille d'Hipparcos diffère de celle d'une étoile de même magnitude dont le centre coïnciderait avec le centre de la planète. Le sommet principal de la courbe de modulation de la planète est décalé par rapport à celui de l'étoile d'un angle égal à l'écart entre le centre et le photocentre et, de plus, la courbe de modulation est aplatie et ce d'autant plus que le diamètre apparent de la planète est grand.

On a construit des modèles de courbe de modulation en partant des données recueillies sur les petites planètes du programme Hipparcos à partir de courbes de lumières obtenues du sol. L'incertitude sur les propriétés de réflexion de la surface entraîne une incertitude sur la position du photocentre. Pour certaines planètes cet écart est de quelques millièmes de seconde si l'on admet un éclairage uniforme de la surface, de quelques centièmes de seconde si l'on admet une diffusion selon la loi de Lambert.

### **Bibliographie**

- Morando B. (1985) ' The modulation curve of a minor planets', Proceedings of the second FAST thinkshop in Marseilles (France). Edited by J. Kovalevsky, CERGA, p.125
- Morando B. (1986) ' A more elaborate model for the modulation curve of a minor planet ', Proceedings of the third FAST thinkshop in Bari (Italy). Edited by P. L. Bernacca & J. Kovalevsky, p. 277
- Morando B. and Lindegren L. (1989) ' The treatment of minor planets and planetary satellites', The Hipparcos Book edited by M. Perryman ESA, vol.3, p. 269
- Morando B., Borsenberger A. (1990) 'The reference frame determined from the observation of minor planets by Hipparcos' Proceedings of the IAU symposium 141 (sous presse).

## PREDICTIONS DES OCCULTATIONS STELLAIRES PAR LES ASTEROIDES

P. Rocher et W. Thuillot.

Les observations d'occultations d'étoiles par les astéroïdes permettent d'obtenir des mesures très précises concernant les positions relatives des objets, leur mouvement, leur forme et leur structure. Elles intéressent donc les astrométristes et les planétologues. Cependant aucune prédiction de ces phénomènes n'est publiée par un organisme officiel de calcul d'éphémérides. Nous avons donc entrepris en 1989 de mettre en place un ensemble de programmes de prédictions de ces phénomènes. Cet ensemble nécessite deux étapes. Une première étape de calcul de rapprochements stellaires donne une sélection d'objets candidats à un phénomène d'occultation, cette étape a été commencée cette année par W. Thuillot avec l'aide de Ch. Ruatti. Une deuxième étape qui est menée par P. Rocher consiste à calculer les paramètres des occultations .

### Généralités:

Les prédictions d'occultations des étoiles par les astéroïdes intéressent de nombreux observateurs, professionnels et amateurs, qui se sont organisés en réseaux internationaux. En Europe les associations EAON (European Asteroidal Occultations Network) et IOTA-Europe (International Occultation Timing Association) animent un tel réseau d'observateurs. On peut estimer à plus de 250 le nombre de personnes concernées par ces observations. Ce sont deux amateurs (E. Goffin en Belgique et D.W. Dunham aux USA) qui actuellement font des prédictions de ces phénomènes et les diffusent auprès des membres de leurs réseaux.

Ces prédictions assurent une précision de l'ordre de 2000km sur la détermination de la trajectoire de l'ombre de l'astéroïde sur la surface terrestre. Ceci est notablement insuffisant pour la réussite des observations d'occultations, puisque la largeur de cette ombre est de l'ordre du diamètre des astéroïdes soit généralement 100km. Lorsque cela est possible des observations astrométriques de dernière minute sont effectuées et la prédiction peut souvent être améliorée alors d'un facteur 10.

### **Prédictions de rapprochements stellaires:**

Le but poursuivi est de maîtriser toute la chaîne des calculs de phénomènes d'occultations stellaires par les astéroïdes:

- prédictions annuelles de rapprochements stellaires
- prédictions annuelles d'occultations
- prédictions améliorées par des observations astrométriques de dernière minute
- réduction d'observations et interprétation.

Nous avons pour cela commencer par mettre au point un calcul de prédictions des rapprochements d'étoiles et d'astéroïdes. Ceci permet de sélectionner rapidement et avec une moindre précision un ensemble d'étoiles et d'astéroïdes qui constitueront un fichier d'événements à analyser ensuite avec beaucoup plus de précision et qui pourraient donner lieu à une occultation. Les rapprochements eux-mêmes sont des événements qui ont un intérêt astrométrique, et qui peuvent faire l'objet d'une publication d'éphémérides.

Cette première étape a été mise au point pour l'instant avec utilisation du Bright Stars Catalog, et du fichier des éléments orbitaux des astéroïdes publiés par l'I.T.A. de Leningrad (*Catalogue of orbital elements of 3936 minor planets numbered by november 23, 1988. Y.V. Batrakov et V. A. Shor*). Nous disposerons en 1990 du SAO et de l'AGK3 ce qui permettra de calculer les possibilités de rapprochements de plus de 3900 astéroïdes avec environ 300 000 étoiles jusqu'à la magnitude 9. D'autres catalogues seront cependant nécessaires pour étudier les nombreux phénomènes concernant les étoiles plus faibles. Nous disposons pour ce but du Guide Star Catalog, nouveau catalogue établi par le Space Telescope Science Institute, qui contient 15 000 000 d'étoiles et sera très bien adapté à notre problème lorsque le catalogue complémentaire des mouvements propres sera publié.

### **Prédictions des occultations stellaires.**

Pour la prévision des rapprochements une orbite approchée de l'astéroïde, obtenue à l'aide du problème des deux corps, est suffisante dans la mesure où la date de l'époque osculatrice est située dans l'année de prévision (On perd une ou deux dizaines de secondes d'arc sur 10 mois). Pour la prédictions des occultations il est nécessaire d'utiliser une orbite plus précise de l'astéroïde. Cette orbite est obtenue en intégrant les équations du mouvement de l'astéroïde et en tenant compte de l'ensemble des perturbations des planètes du système solaire.

Les calculs de prédiction d'une occultation et la détermination de sa zone de visibilité sont analogues aux calculs de prédiction d'une éclipse de Soleil. Le cône d'ombre est remplacé par un cylindre (étoile à l'infini) dont le rayon est égal au rayon de l'astéroïde. Les calculs sont effectués en coordonnées apparentes de la date. On peut comme pour une éclipse calculer des éléments de Bessel qui permettent par la suite de déterminer facilement les circonstances locales de l'occultation (début, maximum et fin).

Les principales sources d'erreurs dans les prédictions sont de deux types :

- La position de l'étoile est calculée à l'aide des valeurs publiées dans les catalogues d'étoiles et ces valeurs peuvent être erronées. Les erreurs peuvent aussi bien porter sur les positions de l'étoile que sur les valeurs des mouvements propres. Ils faut à partir des ces positions calculer dans un premier temps les positions dans le repère du FK5 (J2000), puis utiliser les nouveaux formulaires de précession et de nutation pour calculer la position apparente de l'étoile.

Le remède pour améliorer la position de l'étoile est de l'observer quelques semaines ou quelques mois avant la date d'occultation. Cela règle le problème des mouvements propres puisqu'ils sont négligeables entre les dates d'observation et la date d'occultation. On a remarqué que l'erreur sur la position de l'étoile est presque toujours l'erreur prépondérante dans la prévision des occultations.

- L'autre source d'erreur peut être la mauvaise connaissance de l'orbite de l'astéroïde. On peut avoir une éphéméride qui est bonne au sens des moindres carrés, mais qui présente localement des écarts assez importants avec l'orbite réelle. C'est le cas si les observations utilisées pour calculer l'orbite sont mal réparties dans le temps, ou si le nombre d'observations est faible et si elles sont éloignées de la date d'occultation. Le remède consiste ici encore à observer l'astéroïde quelques semaines et quelques jours avant la date de l'occultation. On peut alors réajuster l'orbite sur la totalité des observations (dans la mesure où on les possède). Cette nouvelle orbite sera bonne sur une grande période de temps. On peut aussi n'ajuster la trajectoire de l'astéroïde que sur les dernières observations, cela revient à faire un lissage de l'orbite au voisinage de la date d'occultation. Cette orbite sera peut-être meilleure localement que l'orbite précédente mais sera mauvaise sur une longue période. Dans la mesure où l'étoile et l'astéroïde sont observés à partir du même lieu, la seconde méthode permet de réduire les éventuelles erreurs systématiques liées au lieu d'observation. Car seule la position relative de l'astéroïde par rapport à l'étoile est utilisée pour la détermination de l'occultation.

Les observations des étoiles et des astéroïdes sont effectuées à l'observatoire de Bordeaux. Ces observations sont données dans le repère FK5 J2000 et dans le repère de la date. Les méthodes de réduction utilisées par M. Rapaport pour calculer ses observations dans le repère J2000 sont identiques aux nôtres ce qui assure une bonne homogénéité à l'ensemble des calculs.

L'étape de calcul des paramètres des occultations fonctionne en partie sur le CIRCE et en partie sur les PC.

- Au CIRCE, les programmes de calcul d'éphémérides, d'amélioration des éphémérides et de prédiction d'occultation sont opérationnels. Le programme d'occultation calcule les circonstances de l'occultation, la bande de centralité et les éléments de Bessel. Les tracés de la bande de centralité peuvent être faits sur l'imprimante Versatec. Le programme permet aussi de récupérer un fichier carte sur le SFENA; ce fichier contient les éléments de Bessel, les coordonnées géographiques de la bande de centralité et différents paramètres permettant le calcul des circonstances locales.

- Sur PC il existe un programme permettant de tracer la bande de centralité sur une carte en projection de Mercator et de calculer les circonstances locales de l'occultation sur le lieu de notre choix; ce programme permet aussi le calcul d'une série de paramètres utilisables pour calibrer les observations vidéo de rapprochements stellaires des astéroïdes. Il existe également un programme de calcul des éphémérides des astéroïdes à l'aide d'intégration numérique ou à l'aide du problème des deux corps. Ce programme utilise comme conditions initiales ou comme éléments osculateurs les éléments des astéroïdes issus de la bande de données fournies par l'Institut d'Astronomie Théorique de Leningrad.

Dans un proche avenir, il sera intéressant de rapatrier la totalité des programmes du CIRCE et de les installer sur micro IBM PC.

*Exemple.*

L'exemple qui suit permet de mettre en évidence la nécessité d'effectuer des observations de dernière minute. Il s'agit de l'occultation de l'étoile BD +19 1171 par l'astéroïde Irène(14) qui a eu lieu le 24/03/1988. L'observation de dernière minute de l'étoile et de l'astéroïde a permis d'améliorer la prédiction, en déplaçant la ligne de centralité de plusieurs centaines de kilomètres.

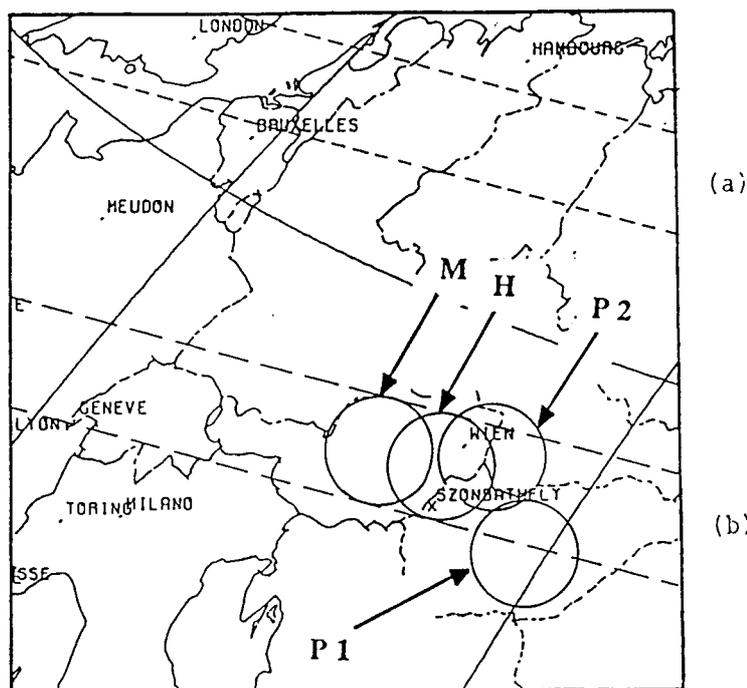
Les calculs de la position de l'étoile à l'aide des données fournies par le catalogue (AGK3) donnent les valeurs suivantes :

$$\alpha = 11^{\text{h}} 53^{\text{m}} 45,134^{\text{s}} \text{ et } \delta = 18^{\circ} 46' 36,156''.$$

Les observations (9) de l'étoile par Bordeaux pour la même époque donnent :

$$\alpha = 11^{\text{h}} 53^{\text{m}} 45,045^{\text{s}} \text{ et } \delta = 18^{\circ} 46' 36,73''$$

Bordeaux nous a également donné une série de dix observations de l'astéroïde qui nous a permis de mettre en évidence l'intérêt d'utiliser une éphéméride obtenue par lissage sur les dernières observations. (Voir carte ci dessous).



Sur cette carte (a) représente la ligne de centralité déduite de l'observation, (b) la ligne de centralité prévue sans les observations de dernières minutes. H correspond à la position de l'ombre observée, M correspond à la position de l'ombre déduite de l'observation vidéo (AVIA) à Meudon, P1 correspond à la prédiction obtenue en prenant la nouvelle position de l'étoile et une éphéméride effectuée à l'aide des éléments osculateurs fournis par un ajustement rescent sur des observations (Projet HIPPARCOS) mais ne tenant pas compte des dernières observations de Bordeaux. P2 correspond à la prédiction obtenue en prenant la nouvelle position de l'étoile et une éphéméride obtenue par lissage sur les dix observations de Bordeaux.

## EPHEMERIDES ET INFORMATIQUE

G. Francou

### 1. ACTIVITES SCIENTIFIQUES LIEES AUX EPHEMERIDES

**Réalisation d'un système de calcul automatique d'éphémérides** : ce système permet de calculer et d'exploiter les éphémérides du Soleil, de la Lune et des planètes. Il se compose de trois ensembles de programmes : traitement des sources, élaboration et utilisation des éphémérides.

**Calcul des positions et vitesses de la Terre pour la mission HIPPARCOS (Consortium FAST)** : une représentation particulière des positions et vitesses de la Terre par rapport au barycentre du système solaire a été élaborée pour assurer sous une forme relativement réduite, une précision de l'ordre de 0,0001" dans les corrections de parallaxe et d'aberration.

**Construction d'éphémérides compactes Soleil, Lune et planètes** : ces tables ont été établies sur des intervalles de temps dont la taille est de l'ordre d'une à plusieurs périodes de révolution des corps ; elles couvrent la période 1950-2020 et assurent une précision comparable à celle fournie par la "Connaissance des Temps" et l'"Astronomical Almanac".

**Détermination des positions d'Uranus et de Neptune pour comparaison avec des observations faites à Bordeaux (cercle méridien)** : cette étude a mis en évidence un écart systématique de l'ordre de 0,4" sur les ascensions droites des deux planètes entre les observations et les éphémérides modernes, écart confirmé par des observations américaines (V.L.A.).

**Calcul d'éphémérides planétaires pour la mission HIPPARCOS (Consortium INCA)** : ces éphémérides ont été construites sous la forme de tables de coefficients de développements en polynômes de Tchebychev couvrant la période 1988-1993 ; elles sont calculées pour différents types de coordonnées et à partir des éphémérides sources BDL82.

**Solution analytique du mouvement des planètes VSOP87** : cette théorie planétaire qui fait suite à VSOP82 déjà développée par P. Bretagnon (1982), se présente sous une forme plus adaptée pour l'étude de développements analytiques tels que ceux utilisés dans la détermination des perturbations planétaires de la Lune, le calcul de positions apparentes, l'expression de la nutation, ou les différences entre les échelles de temps TDT et TDB.

**Calcul des coordonnées différentielles des satellites d'Uranus** : la solution analytique des satellites d'Uranus GUST86 (J. Laskar) a été combinée avec la théorie planétaire VSOP87 (P. Bretagnon) pour déterminer les coordonnées différentielles des satellites avec une précision de l'ordre de 0,02" sur une dizaine d'années et de 0,1" sur 50 ans.

**Détermination des positions et vitesses barycentriques de la Terre** : ces travaux ont été effectués pour faire des ajustements avec le chronométrage des pulsars "milliseconde" et pour faire des comparaisons avec les observations de radio-étoiles réalisées à Nançay.

## 2. PUBLICATIONS D'EPHEMERIDES

### **Connaissance des Temps :**

réalisation, exploitation et maintenance des programmes de calcul des éphémérides "Tchebychev" de cette publication ; participation à la rédaction et à la vérification de l'ouvrage (annuel).

### **Ephémérides Nautiques :**

réalisation et maintenance des programmes de calcul des éphémérides du Soleil, de la Lune et des planètes (annuel).

### **Annuaire du Bureau des Longitudes :**

réalisation et maintenance des programmes concernant les éphémérides astronomiques du Soleil, de la Lune et des planètes (annuel).

### **Epiménides et Epidécides :**

réalisation, exploitation et maintenance des programmes de calculs des Epiménides Nautiques (Soleil, planètes, étoiles) et des Epidécides lunaires (annuel).

### **Ephémérides Aéronautiques :**

responsabilité de la publication ; préparation des éphémérides pour l'imprimeur; calcul des tables annexes et des exemples; rédaction des explications et usages; correction des épreuves (semestriel).

Tous ces travaux sur les publications ont un point commun. La maintenance des programmes demande beaucoup de temps. Elle est liée aux contraintes de l'éditeur, à l'évolution des logiciels et des matériels informatiques utilisés et aux aménagements et améliorations que nous désirons nous-mêmes apporter à ces publications.

## 3. DIFFUSION DES EPHEMERIDES

Parallèlement aux publications officielles d'éphémérides, le Bureau des Longitudes fournit également des éphémérides à la demande du public et des professionnels.

Les demandes les plus fréquentes sont généralement traitées par des programmes écrits à cet effet :

- Copies intégrales ou versions particulières de fichiers déjà existants (programmes sources, théories, fichiers CDT,...)
- Programmes EPH pour les demandes du type positions, levers et couchers, hauteur et azimut, passages au méridien,...
- Programme TCH pour le calcul d'éphémérides Tchebychev à la demande.

D'autres demandes nécessitent des travaux spécifiques de nature et d'importance très variées et dont la fréquence est imprévisible. Sur la période 1988-1989, une quarantaine de demandes de ce type ont été traitées.

#### 4. SITUATION INFORMATIQUE AU BUREAU DES LONGITUDES

Depuis quelques années, le Bureau des Longitudes est en pleine mutation informatique. En l'absence d'ingénieur assurant la responsabilité de cette évolution, un certain nombre de tâches indispensables pour la collectivité ont été prises en charge par le personnel existant :

- Rédaction de notices sur le matériel et le logiciel pour l'utilisation du CIRCE.
- Maintenance de la bibliothèque informatique du service.
- Etude sur l'acquisition de nouveaux matériels informatiques au BDL.
- Installation et maintenance du matériel informatique connecté au CIRCE.
- Administration du système du terminal CIRCE.
- Gestion des consommables liés aux différents matériels.
- Connexion de postes de travail BDL sur le réseau VAX Paris-Meudon.
- Maintenance et entretien du matériel micro-informatique.

Au 1/2/1990, le matériel informatique du Bureau des Longitudes se compose :

- d'un micro-ordinateur SFENA 5-35 assurant les travaux interactifs et en traitement par lots avec le CIRCE et sur lequel sont connectés 16 postes de travail et une imprimante à bande de 600 lignes/minute;
- d'un contrôleur IBM 3174 assurant les travaux interactifs sur le CIRCE et sur lequel sont connectés 13 postes de travail partagés entre le BDL, l'INSU, et l'IAP;
- d'une quinzaine de micro-ordinateurs (IBM, Macintosh, HP, Olivetti) dont 6 sont en libre service;
- d'un micro VAX VS2000 connecté au réseau VAX Paris-Meudon et dont les ressources sont utilisées depuis 9 postes de travail BDL;
- d'un réseau local TOPS équipé de 2 imprimantes laser et sur lequel sont connectés 9 micro-ordinateurs (Macintosh, IBM, HP).

#### Références :

- FRANCOU G., 1984, Calcul automatique des nouvelles éphémérides. Vème colloque du GS5.
- CHAPRONT J., FRANCOU G., MORANDO B., 1984, The calculation of the positions and velocities of Earth during Hipparcos Mission. Notes Techniques et Scientifiques du Bureau des Longitudes S004.
- CHAPRONT J., FRANCOU G., 1985, Tables des positions du Soleil, des planètes et de la Lune entre 1950 et 2020. Notes Techniques et Scientifiques du Bureau des Longitudes S012.
- RAPAPORT M., REQUIEM Y., MAZURIER J.M., FRANCOU G. 1987, Meridian Observations of Uranus and Neptune at Bordeaux Observatory. Comparison with ephemerides. Astron. Astrophys., 179, 317-321.
- BRETAGNON P., FRANCOU G., 1988, Planetary theories in rectangular and spherical variables. Astron. Astrophys., 202, 309-315.
- LASKAR J., JACOBSON R.A., FRANCOU G., 1988, GUST86. Dynamical parameters and analytical floppy ephemerides for Uranian satellites, Uranus colloquium 1988.
- FRANCOU G., 1989, Description et utilisation du SFENA 5-35 pour travaux locaux et en liaison avec le CIRCE. Huit notes techniques.

## MOUVEMENT ORBITAL DES SATELLITES DE MARS ET LIBRATION DE PHOBOS

Michelle Chapront-Touzé

### **Introduction**

Ce travail a été entrepris en 1986 en relation avec le projet soviétique Phobos. Son but initial était de construire une théorie du mouvement de Phobos d'une précision interne de quelques mètres accompagnée d'une théorie du mouvement de Deimos d'une précision interne inférieure au km. Ces théories devaient être utilisées pour l'analyse de données fournies par l'expérience "Mécanique Céleste".

Ces théories sont maintenant achevées. La construction de la théorie orbitale de Phobos, à travers les perturbations dues à la forme du satellite, a nécessité la construction parallèle d'une théorie du mouvement autour du centre de gravité.

L'expérience "Mécanique Céleste" n'a pu être réalisée par suite de la perte des deux sondes Phobos. Toutefois, une théorie abrégée extraite de la théorie de Phobos a été utilisée par le CNES pour sa participation à la navigation de la sonde Phobos 2, dans le cadre d'une coopération internationale.

Par ailleurs, nous avons comparé les théories construites aux observations existantes : observations terrestres réunies par Morley (ESOC) et observations des sondes Mariner 9 et Viking 1 et 2 avant l'expérience Phobos, puis observations fournies par la sonde Phobos 2 avant l'arrêt de ses émissions et observations CCD réalisées au Pic du Midi par une équipe du Bureau des Longitudes (voir l'article de F. Colas). Un système de constantes à introduire dans les théories pour le calcul d'éphémérides a été déduit de ces comparaisons ainsi qu'une contribution à la connaissance de la forme de Phobos.

### **Théories du mouvement orbital de Phobos et Deimos**

Ces théories portent les noms respectifs de ESAPHO et ESADE. Elles se présentent sous forme de séries de Fourier à coefficients numériques et arguments littéraux. Les moyens mouvements des noeuds et des péricentres sont également fournis par les théories sous forme numérique.

La théorie de Phobos inclut les perturbations suivantes :

- Potentiel de Mars jusqu'à l'ordre 9, 9;
- Perturbations solaires, l'orbite aréocentrique du Soleil étant supposée quasi-képlérienne;
- Mouvement du plan de référence;

- Nutation de Mars;
- Perturbations planétaires, y compris les perturbations indirectes résultant de l'action des planètes sur Mars;
- Perturbations par Deimos;
- Potentiel de Phobos jusqu'à l'ordre 2, 2.

La solution abrégée utilisée par le CNES était limitée aux termes de coefficient supérieur à 50 mètres produits par les perturbations des trois premiers types.

La théorie de Deimos, moins précise, ne comporte que les perturbations suivantes :

- Potentiel de Mars jusqu'à l'ordre 3, 3;
- Perturbations solaires (orbite quasi-képlérienne);
- Mouvement du plan de référence (sur les moyens mouvements du noeud et du péricentre seulement).

Des dérivées premières des coefficients des séries de Fourier et des moyens mouvements du noeud et du péricentre de Phobos, par rapport aux éléments moyens métriques, ont également été calculées.

### **Mouvement de Phobos autour de son centre de gravité**

En première approximation, Phobos tourne autour de son plus petit axe d'inertie de telle sorte que le plan de son équateur reste confondu avec son plan orbital et que son plus grand axe d'inertie reste constamment dirigé vers Mars. La différence entre le mouvement réel et ce mouvement approché, dit de Cassini, constitue la libration physique qui se décompose en libration libre et libration forcée.

Nous avons construit une théorie de la libration forcée sous une forme semblable à celle du mouvement orbital, en limitant le potentiel de Phobos à l'ordre 2, 2 et en négligeant les perturbations directes dues au Soleil et à la forme de Mars. Trois jeux de coefficients pour les séries de Fourier ont été calculés en utilisant trois ensembles de paramètres d'inertie de Phobos récemment déterminés, respectivement par Duxbury, Borderies et Yoder, Chao et Rubincam.

La théorie obtenue, calculée avec les paramètres de Borderies et Yoder, a été comparée à la théorie que ces auteurs ont obtenue en tenant compte des termes d'ordre 3 du potentiel de Phobos, négligés dans notre solution. Les principales différences affectent des termes dont la fréquence est proche d'une fréquence de la libration libre et sont dues à des termes du second ordre figurant dans notre solution et négligés dans celle de Borderies et Yoder. Toutefois, cette dernière solution présente sur la nôtre l'avantage d'être littérale.

### **Influence de la forme de Phobos sur son mouvement orbital**

Le principal effet est une perturbation du moyen mouvement du péricentre prenant les valeurs: - 0.000 259, - 0.000 578 et - 0.000 417 °/jour pour les trois ensembles de paramètres d'inertie utilisés. On obtient également des perturbations périodiques dont la plus importante affecte la longitude moyenne avec une période de 4105

jours. L'amplitude de ce terme varie de  $-28''.4$  à  $-36''.5$  pour les ensembles de paramètres utilisés, soit un déplacement de Phobos pouvant atteindre 1.3 à 1.6 km.

### Comparaison aux observations

La comparaison aux observations la plus complète a porté sur 9062 mesures terrestres, 158 mesures Mariner, 550 mesures Viking, 74 mesures de Phobos par Phobos 2 et 16 mesures de Deimos par Phobos 2, chaque observation spatiale ou observation terrestre récente fournissant deux mesures.

18 paramètres ont été ajustés par la méthode des moindres carrés, soit pour chaque satellite 6 éléments moyens, l'accélération séculaire et des "corrections observées" aux moyens mouvements du noeud et du péricentre.

L'étude des "corrections observées" aux moyens mouvements du noeud et du péricentre de Phobos a montré un bon accord des perturbations dues à la forme de Phobos, calculées avec les paramètres de Borderies et Yoder, avec l'observation. On a également déduit des "corrections observées" aux moyens mouvements des noeuds des deux satellites des estimations peu précises des paramètres  $J_2$  et  $J_4$  du potentiel de Mars.

L'écart-type sur les positions de Phobos obtenues à l'issue du meilleur ajustement varient de 2 à 4 km environ sur la période 1989 - 2000. Pour Deimos, ils varient de 7 à 10 km, mais les incertitudes réelles sont probablement plus importantes, en particulier pour Deimos.

Les valeurs trouvées pour les accélérations séculaires de Phobos et Deimos sont respectivement  $0.9518 \pm 0.0063 \cdot 10^{-8}$  et  $-0.377 \pm 0.047 \cdot 10^{-9}$  °/jour<sup>2</sup>.

### Publications

Chapront-Touzé, M.: 1988, "ESAPHO: a semi-analytical theory for the orbital motion of Phobos", *Astron. Astrophys.* **200**, 255-268

Chapront-Touzé, M.: 1989, "Construction d'une éphéméride de Phobos issue de la théorie ESAPHO", *Notes Scientifiques et Techniques du Bureau des Longitudes* **S024**

Chapront-Touzé, M.: 1990, "Phobos' physical libration and complements to the ESAPHO theory for the orbital motion of Phobos", *Astron. Astrophys.* , à paraître

Chapront-Touzé, M.: 1990, "Orbits of the Martian satellites from ESAPHO and ESADE theory", soumis à *Astron. Astrophys.*

## EPHEMERIDES des SATELLITES de NEPTUNE : TRITON et NEREIDE

C.Le Guyader

### Motifs scientifiques des travaux

Nous construisons numériquement des éphémérides de satellites naturels à l'aide d'un programme d'intégration donnant les solutions recherchées, développées en séries de Taylor d'ordres élevés. (Note Technique et Scientifique du BDL S025)

Les corps étudiés seront placés dans un même "moule", en l'occurrence le système composé du soleil et des neuf planètes principales.

Si ceci peut paraître illusoire au vu de la précision actuelle des observations, de telles éphémérides peuvent néanmoins servir à construire et vérifier des théories analytiques mieux élaborées et éventuellement à détecter plus facilement des surprises possibles (résonnances par exemple).

Les coordonnées et vitesses de ces corps seront repérées dans un système d'axes planétocentriques et dans l'écliptique et équinoxe moyens J2000.

### Ephémérides des satellites de Neptune

Le but du travail entrepris est de construire une éphéméride pour chacun des deux satellites principaux de Neptune: Triton et Néréide.

Dans un premier temps seul Néréide sera envisagé, dans un second nous lui adjoindrons Triton et pourrons ainsi voir son influence.

### Première intégration de Néréide:

Nous sommes partis des conditions initiales données par L.E Rose (1974) et avons effectué une première intégration de Néréide afin de couvrir 44 observations de 1949 à 1969 d'une part et 6 nouvelles observations de 1977 à 1981 d'autre part.

Les conditions initiales des planètes et du soleil sont issues d'une éphéméride déjà construite dans le repère J2000, (N.T S025) celles de Néréide ont été rapportées dans ce même repère après correction d'équinoxe et calcul de la précession équatoriale.

### Comparaison aux observations

Les premières observations, (Mai 1949, Juin 1969) ont été faites par Kuiper (McD) et Van Biesbroeck (McD).

Les secondes, (Mai 1977, Avril 1981) ont été effectuées par les observateurs suivants: P. Shelus (McD), J.D. Mulholland (McD) et CH. Veillet (ESO). Toutes ces observations sont rapportées à l'équateur et équinoxe moyens 1950.0.

Les corps étudiés étant repérés par rapport à des axes neptunocentriques et dans l'écliptique et équinoxe J2000, nous intégrerons donc notre système des 11 corps dans ce repère pour chaque date  $t$  d'observation, et calculerons ensuite pour chacune de celles ci, les positions et vitesses de Neptune et du satellite dans un repère géocentrique, équinoxe et équateur moyens 1950.0

Nous tiendrons alors compte du temps de lumière  $\tau$  pour avoir la position géométrique du satellite à l'instant  $t-\tau$  et lui rajouterons pour finir la partie variable de l'aberration due à l'excentricité de l'orbite terrestre.

Nous aurons ainsi obtenu ses coordonnées astrométriques et pourrons alors comparer nos résultats avec les  $\Delta\alpha \cos\delta$  et  $\Delta\delta$  calculés à partir des observations.

### Deuxième intégration de Néréide

Nous referons le même travail mais en partant cette fois de conditions initiales plus récentes (Veillet) et nous comparerons les nouveaux résultats (O-C) avec les précédents.

### Intégration simultanée des deux satellites de Neptune

Nous rajouterons le premier satellite de Neptune, Triton (conditions initiales issues des observations de Colas) et regarderons son influence sur l'orbite de Néréide. Nous calculerons les (O-C) de ces deux orbites.

Nous ajusterons enfin les conditions initiales sur les observations en améliorant les (O-C) par la méthode des moindres carrés et effectuerons alors notre intégration newtonienne définitive.

### Aplatissement de Neptune

Nous regarderons aussi les effets de l'aplatissement de Neptune dont le facteur d'ellipticité  $J_2$  est égal à  $4 \cdot 10^{-3}$  (CDT 1990).

### Conclusion

Nous aurons ainsi obtenu numériquement une éphéméride précise pour chacun des deux satellites principaux de Neptune.

Nous regarderons aussi pour finir si la quasi égalité des deux périodes de la Terre (autour du soleil) et de celle de Néréide (autour de Neptune) a joué un rôle dans notre intégration.

Les effets relativistes seront négligés (Mignard, 1974).

THEORIE DES SATELLITES GALILEENS DE JUPITER:  
LIBRATION ET SOLUTION VARIATIONNELLE

D.T. Vu et W. Thuillot

Nous avons poursuivi la construction de la nouvelle théorie des mouvements des satellites galiléens de Jupiter. Ce travail a pour base la méthode de J.L. Sagnier (1981). Les derniers travaux que nous avons effectués sur ce sujet concernent deux points particuliers: le calcul des paramètres de la libration à un degré élevé, et l'étude de l'influence des termes résonnants et à longue période dans la méthode d'intégration du système variationnel.

**Généralités:**

Le système galiléen présente du point de vue de la mécanique céleste une superposition de plusieurs difficultés. Il présente notamment des commensurabilités entre les moyens mouvements créant des résonances de premier ordre, et une résonance exacte, la libration laplacienne. On doit prendre en compte également des interactions fortes, l'action perturbatrice extérieure du Soleil, et un couplage du mouvement des plans des orbites avec celui de l'équateur.

La théorie de Lieske (1977) utilisée actuellement dans les calculs d'éphémérides est basée sur la méthode de Sampson. Elle tient compte de ces effets, mais donne un modèle des mouvements insuffisamment précis. On peut le constater par exemple dans l'analyse des éclipses sur une période de plus de trois siècles où les résidus obtenus révèlent des effets périodiques (Lieske, 1986). Cette théorie ne comprend pas d'étape de construction d'une solution autonome, mais utilise un développement externe pour modéliser cette solution à longue période.

On peut donc attendre de la construction d'une nouvelle théorie, incluant un bon modèle de mouvement à longue période issu d'un calcul interne, une précision accrue. Une théorie générale complète de degré 2 devrait représenter un tel modèle.

Les satellites galiléens sont les satellites qui ont été le plus observés et sur la plus grande période de temps. Ils présentent également la possibilité d'observer des phénomènes mutuels, observations très précises. Un des buts de ce travail est donc en particulier de disposer d'un nouvel outil d'analyse de toutes ces observations.

### Etude de la libration:

Notre théorie comprend l'élaboration d'une solution intermédiaire et d'une solution variationnelle. Les résultats obtenus précédemment ont permis de développer une nouvelle solution de la libration.

La libration de Laplace est une résonance exacte des moyens mouvements des trois premiers satellites de Jupiter. A chaque instant, la longitude de l'un d'eux contient un terme périodique de la forme  $Q\ell$  où  $\ell$  est la longitude de la libration et  $Q$ , un facteur caractérisant la part de contribution de ce satellite à la libration. C'est l'unique terme périodique direct provenant de la libration. Sa phase et son amplitude sont des constantes issues de la comparaison à l'observation, la période est déduite de la théorie. La théorie de Sampson a été construite sur l'hypothèse d'une amplitude de la libration nulle. Lieske (1977) a donné à cette amplitude la valeur  $0^{\circ},056$  qui correspond pour Europe à un terme périodique portant une amplitude de  $0,00027$  radian jovicentrique (8800km). Deux autres valeurs tirées respectivement des versions E2 et E2x3 de sa théorie sont un peu plus grandes  $0^{\circ},0657$  et  $0^{\circ},0665$ . Un autre ajustement réalisé par J. E. Arlot (1982) donne  $0^{\circ},0859$ .

Outre ces effets directs, il y a d'autres effets de la libration :

- une petite modification des facteurs d'intégration car la libration introduit aussi une faible perturbation séculaire du moyen mouvement et une petite modification du demi-grand axe de l'orbite.

- des corrections des coefficients des longitudes vraies suivant une méthode classique de calcul de termes forcés. Cette correction est d'autant plus importante que la fréquence des termes considérés est proche de celle de la libration.

- des corrections des fréquences propres obtenues par un système critique suivant la méthode de Souillart.

L'équation de la libration peut être développée par rapport à l'ordre des masses, par rapport au degré des variables et par rapport au degré des harmoniques de l'argument de la libration c'est à dire la valeur de  $k$  dans l'expression de l'équation  $d^2\ell/dt^2 = \sum C_k \sin k\ell$ . Les travaux de Sampson et de Lieske sont d'ordre 1, de degré 2 des variables et de degré 2 des harmoniques. Plus récemment, Karangwa (1988) a utilisé un formalisme hamiltonien dans la construction de l'équation de la libration, où le nombre de variables est réduit et les termes de courtes périodes écartés du développement, le degré  $k$  des harmoniques a atteint 8. Dans notre calcul précédent (Vu, 1986) le degré  $k$  a été limité à 4. Récemment ce calcul a été développé jusqu'au degré 4 des variables et au degré 11 des harmoniques. Le calcul a nécessité le développement des fonctions du temps jusqu'au degré 36 des arguments angulaires au lieu de 14 précédemment. Ce travail a contribué à améliorer notre ancien résultat et à donner une période de libration plus précise. Les principaux résultats sont les suivants:

. Facteurs de libration :

$$Q_1 = 0,1236 \text{ (Io)} \quad Q_2 = -0,2759 \text{ (Europe)} \quad Q_3 = 0,0244 \text{ (Ganymède)}$$

. Coefficients des termes de l'équation de la libration :

$$\begin{array}{ll} C_1 = -13493040.10^{-12} & C_2 = 1962400.10^{-12} \\ C_3 = -120055.10^{-12} & C_4 = 12229.10^{-12} \\ C_5 = -1849.10^{-12} & C_6 = 402.10^{-12} \\ C_7 = -118.10^{-12} & C_8 = 10.10^{-12} \\ C_9 = +7.10^{-12} & C_{10} = 2.10^{-12} \quad C_{11} = 0 \end{array}$$

- . Equation de la libration après réduction en série de  $f$  :  
$$d^2 f / dt^2 = - 0,0000098333903 f (1 - 0,00625 f^2 - 0,02458 f^4)$$
- . Période de la libration : 2003,68 jours.

#### Etude du système variationnel:

La solution générale de la théorie est obtenue après résolution d'un système variationnel. On construit ainsi le développement d'une solution au voisinage de la solution intermédiaire. La solution variationnelle contient la plupart des termes à longue période de la théorie liés aux mouvements des plans des orbites.

La méthode d'intégration appliquée à ce type de système est analogue à celle Krasinski-Brumberg (Brumberg, 1970). C'est une méthode de transformation de variables qui permet en imposant à la solution de garder un caractère quasi-périodique, de séparer les termes périodiques des termes autonomes et d'en déduire un développement de la solution en fonction des petits paramètres.

Appliquée au système de degré 1 cette intégration a donné une solution d'ordre 2 satisfaisante pour ce niveau de précision. Les résonances d'ordre 1 étaient alors prises en compte dans le calcul des fréquences propres grâce à l'adaptation de la méthode de Souillart.

La deuxième approximation de degré 2 donne bien les familles de termes périodiques attendues, mais montre pour certains termes des écarts aux termes périodiques des autres théories. Certains de ces écarts peuvent s'expliquer par l'influence de termes à longues périodes dans la méthode utilisée.

En effet, l'application de cette méthode à des systèmes suffisamment proches d'un système dynamique, et intégrables analytiquement, permet de voir que les termes périodiques de longue période gênent la convergence de la solution. Les périodes proches des périodes propres mais inférieures donnent un développement lentement convergent, et ceux de période supérieure donnent un développement divergent. Le système variationnel complet présente des termes de ce type, puisque les fréquences propres sont comprises entre  $27 \cdot 10^{-4}$  et  $0.3 \cdot 10^{-4}$  rad/j, et qu'apparaissent des termes d'origine solaire et leurs harmoniques qui ont pour fréquence fondamentale  $14.5 \cdot 10^{-4}$  rad/j.

#### Conclusion :

Les résultats obtenus sur l'étude de la libration complètent bien l'élaboration de la solution générale. Ils permettent notamment d'avoir une bonne estimation des contributions en longitude de la libration, et de pouvoir ainsi, si on applique la méthode classique, calculer des corrections précises en longitude vraie dues aux effets indirectes de la libration.

Nous prévoyons maintenant de résoudre le problème posé par l'influence des termes à longue période dans la méthode d'intégration du système variationnel.

Nous aborderons également l'étude des termes solaires forcés en inclinaison. Cet effet n'est pas inclus dans la théorie de Lieske-Sampson et mérite d'être évalué.

Références :

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

Brumberg, V.A.: 1970, *Periodic Orbits Stability and Resonances*. D. Reidel Pub. Co. Dordrecht, Holland, 410.

Karangwa, D.: 1988, Thèse, Faculté Universitaire de Namur.

Lieske, J.H.: 1977, *Astron. Astrophys.* **56**, 333

Lieske, J.H.: 1986, *Astron. Astrophys.* **154**, 61

Sagnier, J.-L.: 1981, Thèse d'Etat, Université Paris 6.

Vu, D.T.: 1986, Thèse d'Etat, Observatoire de Paris

CAMPAGNE D'OBSERVATION "PHEMU"  
OBSERVATIONS ET REDUCTIONS "AVIA"

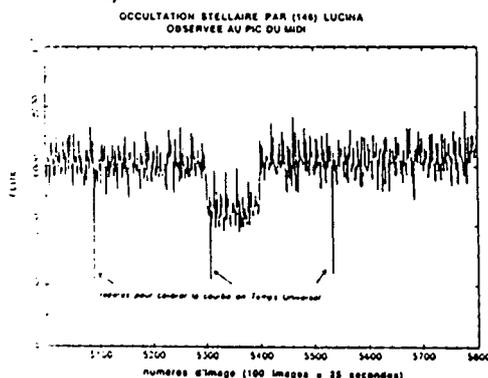
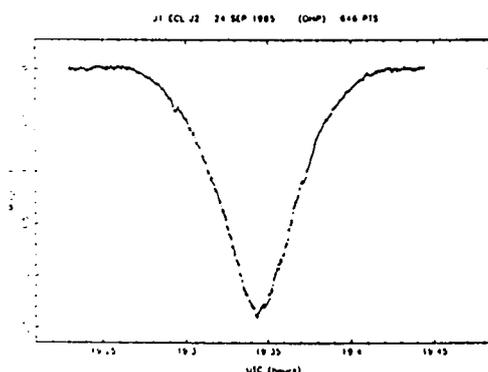
J.-E. Arlot

Le but de ces travaux est d'obtenir une astrométrie de haute précision des astres du système solaire, en particulier les satellites galiléens de Jupiter et les astéroïdes.

Pour obtenir des observations de position, il est possible d'observer ces positions directement (plaques photographiques, images CCD,...) ou indirectement (observations de phénomènes, en particulier éclipses ou occultations). Les meilleures précisions obtenues jusqu'à présent pour les satellites galiléens de Jupiter s'échelonnent ainsi :

nature des observations	précision individuelle	
éclipses par Jupiter (obs. visuelles)	0".25	1000km
astrographe (courte focale)	0".20	800km
astrographe (longue focale)	0".06	240km
phénomènes mutuels (obs. visuelles)	0".05	200km
phénomènes mutuels (obs. photoélectriques)	0".01	40km

La précision des observations directes de position est limitée par la turbulence atmosphérique, l'instabilité thermique des instruments et la mauvaise qualité des catalogues d'étoiles. L'observation différentielle, à longue focale et numérique (CCD ou AVIA) permet d'améliorer la précision des données. La précision des observations de phénomènes est limitée par la résolution temporelle, la sensibilité des détecteurs et la modélisation du signal observé pour la réduction. On trouvera ci-après deux types de courbe de lumière obtenue lors d'une occultation : occultation mutuelle des satellites galiléens (rapport signal/bruit élevé) et occultation d'une étoile (source quasi-ponctuelle) par un astéroïde (interruption brutale d'un flux de lumière qu'il faut dater précisément).



### Les phénomènes mutuels

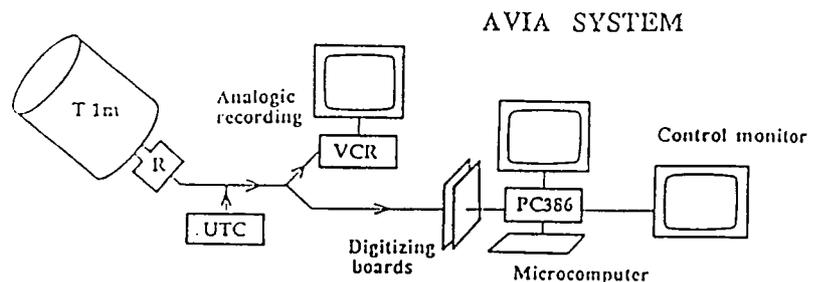
Tous les 6 ans, la Terre et le Soleil passent dans le plan orbital commun des satellites galiléens : ceux-ci s'occultent et s'éclipsent alors mutuellement. C'est l'absence d'atmosphère de ces corps qui confère aux observations de ces phénomènes leur grande précision. Nos travaux sur ce sujet ont été jusqu'à présent l'organisation de campagnes d'observation (en 1985 nous avons rassemblé 40 observateurs et obtenu 150 observations), le dépouillement et la réduction des observations effectuées (cf la communication de Ch. Ruatti) et la modélisation des courbes de lumière (cf la communication de W. Thuillot).

Dans l'avenir, nous envisageons une nouvelle campagne d'observation en 1991 : nous avons été rejoints par de nouveaux observatoires (Catane en Italie, Simosato, Sirahama et Bisei au Japon) et la déclinaison positive de Jupiter va favoriser les observations dans l'hémisphère nord. Afin de pouvoir effectuer le maximum d'observations, des crédits exceptionnels ont été demandés au Ministère de l'Education Nationale. Nous envisageons aussi d'améliorer encore la modélisation des courbes de lumière, en particulier en ne considérant plus l'albedo de surface des satellites étant comme uniforme (travail de thèse de P. Descamps). Ces travaux ayant une composante planétologique, une coopération est engagée dans le cadre de la campagne internationale IJW préparatoire à la mission de la sonde spatiale Galileo. Signalons enfin l'intérêt de l'observation infrarouge des phénomènes mutuels. Dans le cas d'une occultation de Io, les volcans détectés par Voyager peuvent être précisément localisés (observations de 2.2 à 8.6  $\mu\text{m}$ ). Dans tous les cas, les phénomènes mutuels peuvent être observés durant le jour (observation à 2.2  $\mu\text{m}$ ) ce qui augmente les observations possibles. C'est dans ce but que nous adaptons actuellement un photomètre infrarouge. Des essais ont déjà été conduits avec le télescope de 193 cm de l'OHP.

En conclusion, seule l'observation des phénomènes mutuels permet d'atteindre une précision meilleure que 0".01 sur une campagne. Les résultats de plusieurs campagnes (séparées de 6 ans) peuvent nous permettre de quantifier l'accélération séculaire de Io.

### L'opération AVIA

Le but de cette opération était de réaliser des observations astrométriques et photométriques simultanées d'objets en mouvement rapide. Pour cela, nous avons utilisé un récepteur rapide Vidicon à sortie analogique 50 Hz représentant une image bi-dimensionnelle numérisée puis traitée en temps réel ou en temps différé. Chaque image est datée en UTC. Le schéma ci-contre montre la chaîne d'acquisition AVIA.



Les avantages d'un tel système sont :

- la rapidité du récepteur (50 Hz) permet l'enregistrement d'occultation très courte (inférieure à la seconde),
- la nature bi-dimensionnelle du récepteur permet d'écartier les artefacts dans le cas d'occultations rapides, d'effectuer des observations photométriques dans des conditions difficiles grâce au fenêtrage de la cible et d'obtenir des données astrométriques en grand nombre lors de rapprochements entre objets rapides, mesurés à 0".03 près,
- le stockage analogique possible (une bande d'une heure contient 23 000 Gigaoctets, difficiles à stocker sous forme numérique).

Les inconvénients du système AVIA proviennent de :

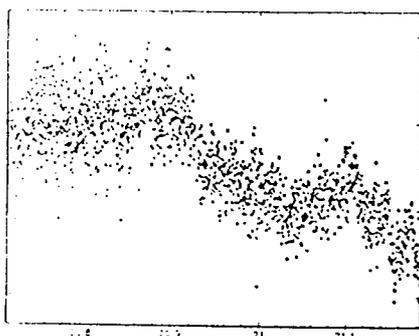
- la rapidité du récepteur qui en limite la sensibilité,
- l'utilisation d'un intensificateur électrostatique qui déforme les champs et nécessite une calibration difficile pour obtenir une astrométrie correcte.

L'avenir du système est le passage à la cible CCD lorsque la rapidité du récepteur n'est pas nécessaire. Cependant, il n'y a pas d'alternative pour les occultations d'étoiles.

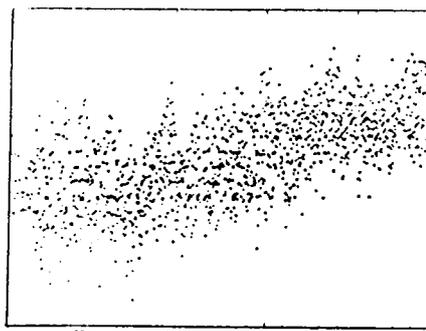
Examinons maintenant quelques exemples d'observations réalisées avec le système AVIA :

- occultation d'étoile par l'astéroïde Lucina : l'observation a permis de définir la trajectoire de l'ombre de l'astéroïde déduite d'une occultation (précision 0".002) et d'une analyse astrométrique (précision 0".03). La photométrie bi-dimensionnelle a permis de plus la détection d'un objet proche de l'astéroïde Lucina.

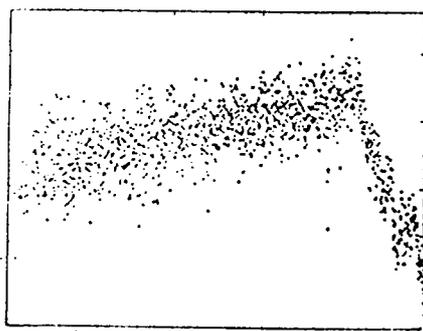
- observation photométrique d'un phénomène mutuel des satellites de Jupiter dans de très mauvaises conditions photométriques (passages nuageux). L'enregistrement simultané du fond du ciel et d'un objet de référence a permis de restituer une courbe photométrique finale de bonne qualité. Le système AVIA simule ainsi un photomètre à plusieurs voies spatiales.



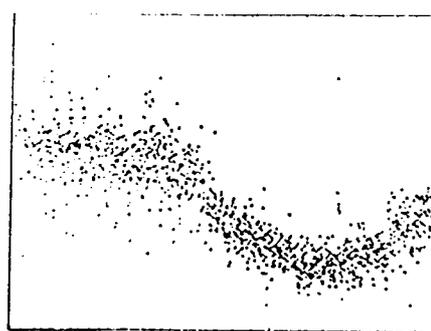
Courbe brute



Fond de ciel



Objet de référence



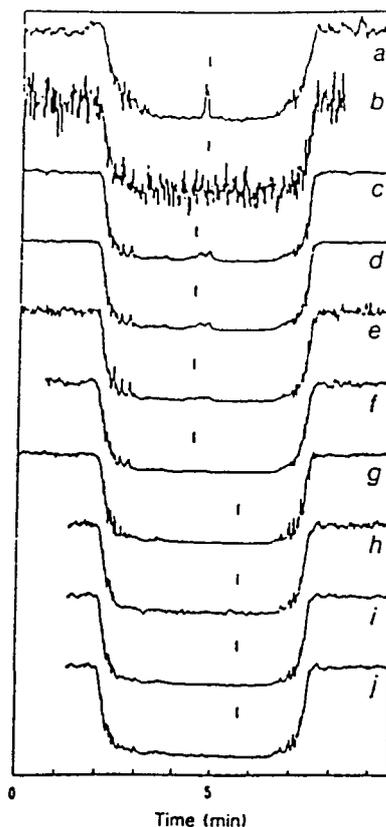
Courbe finale

- observation en réseau d'une occultation d'étoile par Titan.

La courbe (a) obtenue à Meudon par le système AVIA permet, combinée aux autres courbes, de mettre en évidence la nature des différentes couches de l'atmosphère de Titan ainsi que sa position astrométrique précise à l'instant de l'occultation.

La surveillance des rapprochements étoiles/astéroïdes permet également de raccorder les champs d'étoiles avec une précision de 0".03, ce qui présentera d'autant plus d'intérêt que l'une des étoiles sera dans le catalogue Hipparcos.

Actuellement le système AVIA, qui a été financé par l'INSU il y a quelques années et mis sur pied par Christian Allet (ingénieur INSU), fonctionne en routine à la surveillance des occultations d'étoiles ainsi qu'à l'observation des phénomènes mutuels des satellites galiléens.



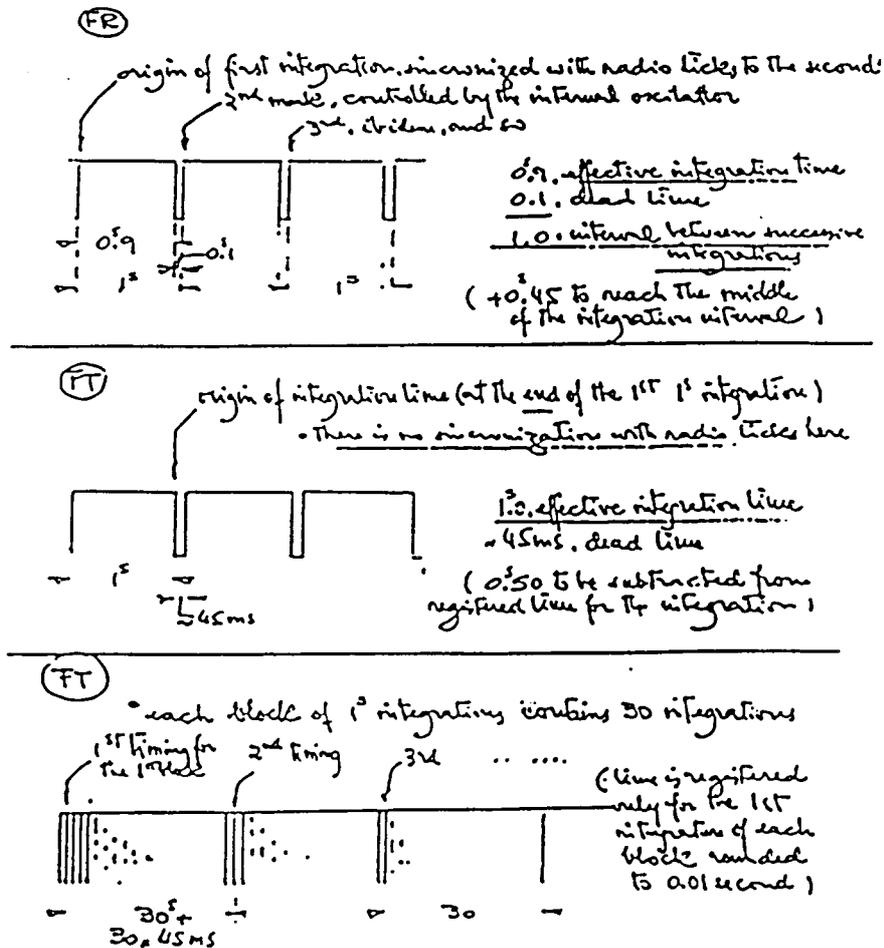
DEPOUILLEMENT DES RESULTATS DE LA CAMPAGNE D'OBSERVATION  
DES PHENOMENES MUTUELS DES SATELLITES GALILEENS DE JUPITER

Ch. RUATTI

A la suite de la campagne PHEMU85 s'est posé le problème du dépouillement et de la réduction des nombreuses données. En effet, de nombreux observatoires européens ont participé a cette campagne ainsi que 2 observatoires sud-américain : La Silla au Chili et Brasopolis au Brésil.

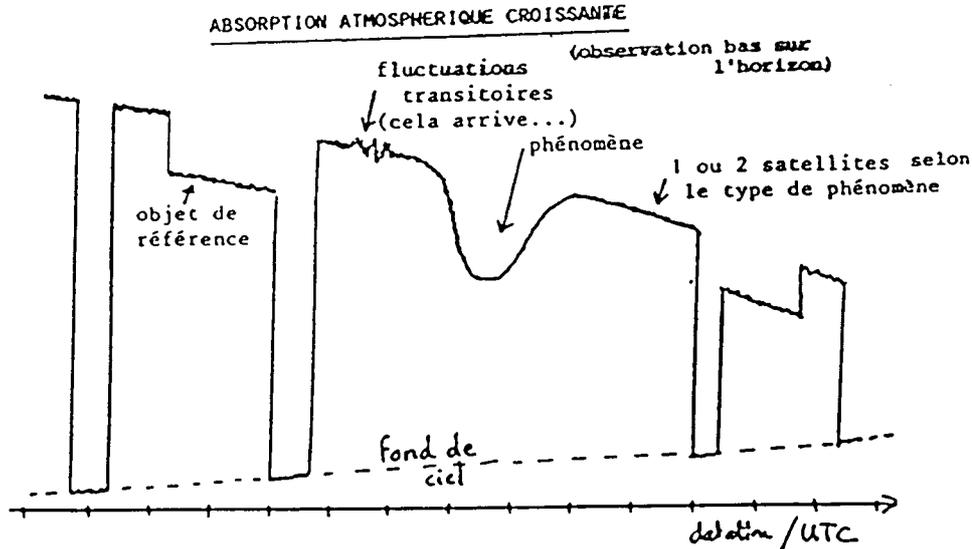
Ce travail a été commencé par V. D'Ambrosio et poursuivi par J.-E. Arlot et moi-même.

Les données que nous avons recueillies étaient en général brutes; c'est-à-dire que les courbes photométriques se présentaient sous des formes variées, non seulement de formats différents ( listings, micro-k7, bandes magnétiques, bandes papier, ...), mais aussi présentées avec une logique différente, ce qui nous a obligé à construire des programmes spécifiques pour chaque lieu d'observation mais aussi quelques fois plusieurs programmes par lieu d'observation. Ces programmes nous ont permis de disposer des données brutes sous une forme cohérente: flux enregistrés en fonction du Temps Universel, données complémentaires sur le fond de ciel ou sur des objets de référence, ou bien magnitudes enregistrées en fonction du Temps Universel.



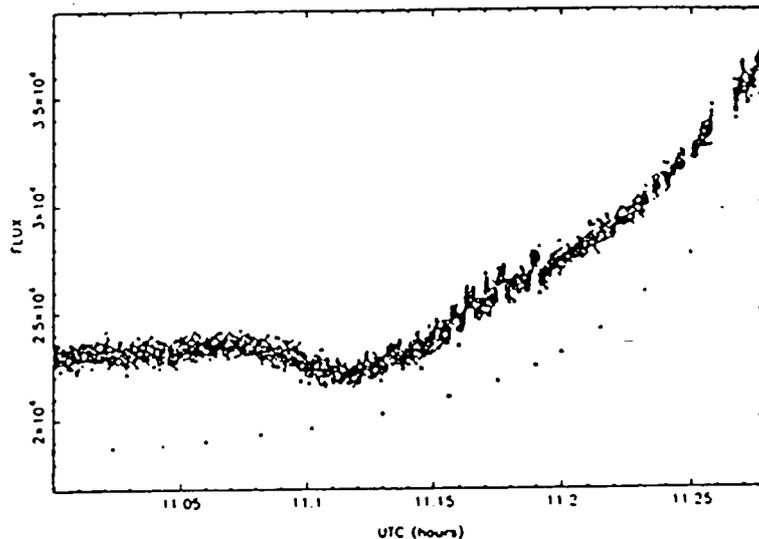
Exemple de calibration en Temps Universel du signal en sortie de photomètre

Un programme de réduction a ensuite été construit pour transformer les données brutes en chutes en magnitude réduites.



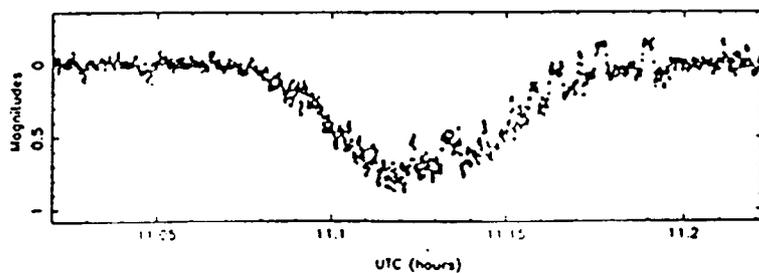
Ce programme avait pour but d'extraire la valeur du fond de ciel des flux enregistrés ( surtout pour les observations durant le crépuscule ), d'effectuer la compensation pour la masse d'air ( *Formule de Bemporad* ) et aussi de compenser pour une absorption anormale durant le phénomène. Cette absorption est très difficile à modéliser et cette modélisation se fait en général empiriquement. Pour simplifier, on suppose que le flux des satellites est le même avant et après le phénomène, et on corrige en conséquence.

J3 OCC J1 03 JUN 1985 (ESO) 4746 PIS

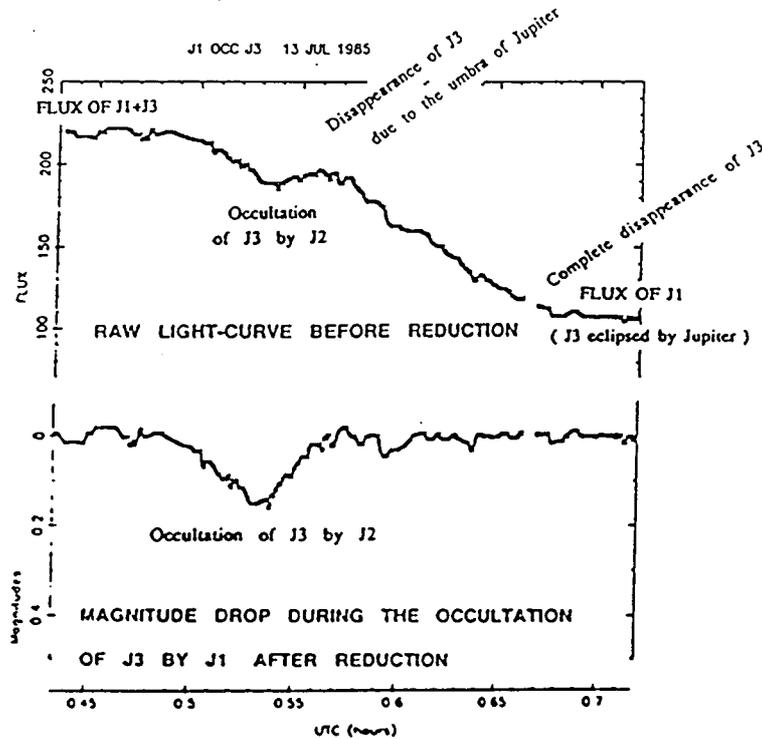


Exemple d'observation brute et réduite effectuée durant le crépuscule

J3 OCC J1 03 JUN 1985 (ESO) 1790 PIS



Quelques cas plus délicats se sont produits, par exemple lorsqu'un satellite commençait à être éclipsé par Jupiter pendant un phénomène ou bien lorsque le télescope était occulté progressivement par la coupole. Ces deux cas sont cependant très facilement modélisables.



Observation d'une occultation mutuelle se déroulant pendant une éclipse par JUPITER ( donnée brute et donnée réduite )

Toutes les courbes ainsi réduites, le but a été de construire un catalogue cohérent de données aisément analysable par un utilisateur quelconque. Par exemple, certaines courbes étaient données avec une constante de temps d'intégration trop faible, c'est-à-dire qu'elles comportaient trop de points ( précision surabondante ). Une moyenne judicieuse a donc dû être appliquée .

Actuellement, le travail de dépouillement et de réduction est presque terminé compte tenu du fait que des observations continuent à nous parvenir. Nous allons néanmoins publier un catalogue, pour cela une analyse succincte est en cours et des tracés homogènes ont été réalisés. La création d'une banque de données accessible à tous est à l'étude actuellement.

MODELISATION DE PHENOMENES MUTUELS  
DES SATELLITES GALILEENS DE JUPITER

W. Thuillot

En 1979 et 1985 nous avons organisé des campagnes d'observation des phénomènes mutuels. Ces phénomènes offrent un moyen de réaliser avec précision des mesures de positions relatives des satellites galiléens. Cette précision nous semble cependant améliorable par l'utilisation d'une modélisation permettant d'extraire des informations de la forme même des courbes de lumière enregistrées. Cette année j'ai développé ce type de modélisation en m'appuyant pour certains points sur des résultats déjà obtenus par B. Morando (1986).

**Buts poursuivis:**

Le but principal poursuivi est de disposer d'une méthode et d'un moyen d'analyse des courbes de phénomènes observés qui permettent d'extraire de ces données certaines informations astrométriques que l'on ne pouvait pas atteindre, par un simple ajustement polynomial comme on le pratique jusqu'à présent. Il est nécessaire pour cela de tenir compte de l'aspect physique des surfaces des satellites, la conséquence est que nous pouvons accéder aussi à de nouvelles informations d'ordre planétologique.

La forme des courbes de lumière observées lors des phénomènes mutuels est fonction de plusieurs paramètres. Les positions relatives des centres des satellites, et leurs vitesses sont les principaux. Mais d'autres paramètres semblent également suffisamment importants pour être pris en compte. Ainsi Ferrier (1983) a montré l'influence d'une répartition non uniforme d'albédos. Plus récemment Aksnes (1986) montrait que la conjugaison de l'effet de phase et d'une loi de réflexion de la lumière pouvait expliquer un effet systématique observé dans les résidus en longitude.

Un modèle de phénomène mutuel permet de tenir compte de tous ces paramètres: ceux liés à l'astrométrie des satellites et ceux liés aux propriétés de leur surface. On peut ainsi expliquer des asymétries, des irrégularités, déjà observées dans certaines courbes, et surtout on peut ainsi découpler les effets astrométriques des effets physiques.

L'ajustement polynomial classique permettait d'extraire une date de minimum de lumière, une chute en magnitude, et éventuellement, mais avec une mauvaise précision, des dates de début et fin de phénomène.

L'utilisation d'un modèle permet d'obtenir les mêmes résultats avec plus de précision, et elle permet, en outre, de calculer la distance minimum des centres des satellites, son orientation, et la date correspondante. Elle permet aussi de calculer des corrections de paramètres physiques liés à la nature de la surface et au modèle de réflexion de la lumière utilisé.

#### **Méthode utilisée:**

Le modèle que j'ai réalisé est basé sur l'utilisation d'une loi de réflexion de la lumière que l'on peut choisir en fonction du satellite concerné, celle de Hapke semblant bien adaptée à ces analyses. La méthode (Thuillot et Morando, 1990) consiste à calculer l'intégrale de surface de la quantité de lumière réfléchie par le satellite en cours d'occultation ou d'éclipse à tout instant du phénomène, et à normaliser cette quantité à la quantité de lumière réfléchie en dehors du phénomène.

Les éclipses se caractérisent des occultations par le fait que la quantité de lumière réfléchie par un élément de surface du satellite éclipsé dépend de la position relative du soleil et du satellite éclipsant. Il faut donc calculer l'éclairement solaire de chaque élément de surface, en tenant compte également de l'assombrissement centre-bord du Soleil.

On prend en compte la phase en excluant du calcul tout point non éclairé (cas des occultations) ou non visible par un observateur terrestre (cas des éclipses).

L'ajustement de la courbe de lumière modélisée sur la courbe observée nécessite la connaissance des dérivées partielles de la chute en magnitude par rapport aux paramètres que l'on désire calculer. On utilise pour cela la méthode des différences finies.

#### **Exemple:**

La figure 1 montre la courbe observée par J. Barroso Jr. au Brésil le 29 mai 1985 (Arlot et al., 1989). Cette occultation de Callisto par Europe présentait un palier qui semblait bien être d'origine observationnel étant donné la bonne qualité du signal avant et après le phénomène. Le modèle d'occultation mutuelle appliqué à cette observation confirme ce palier qui est dû à l'existence d'une phase maximum à cette date, et à la configuration géométrique des satellites au moment du phénomène. L'écart entre la date du minimum de distance des centres des satellites et celle du minimum de lumière que l'on peut en déduire est de plus d'une minute de temps.

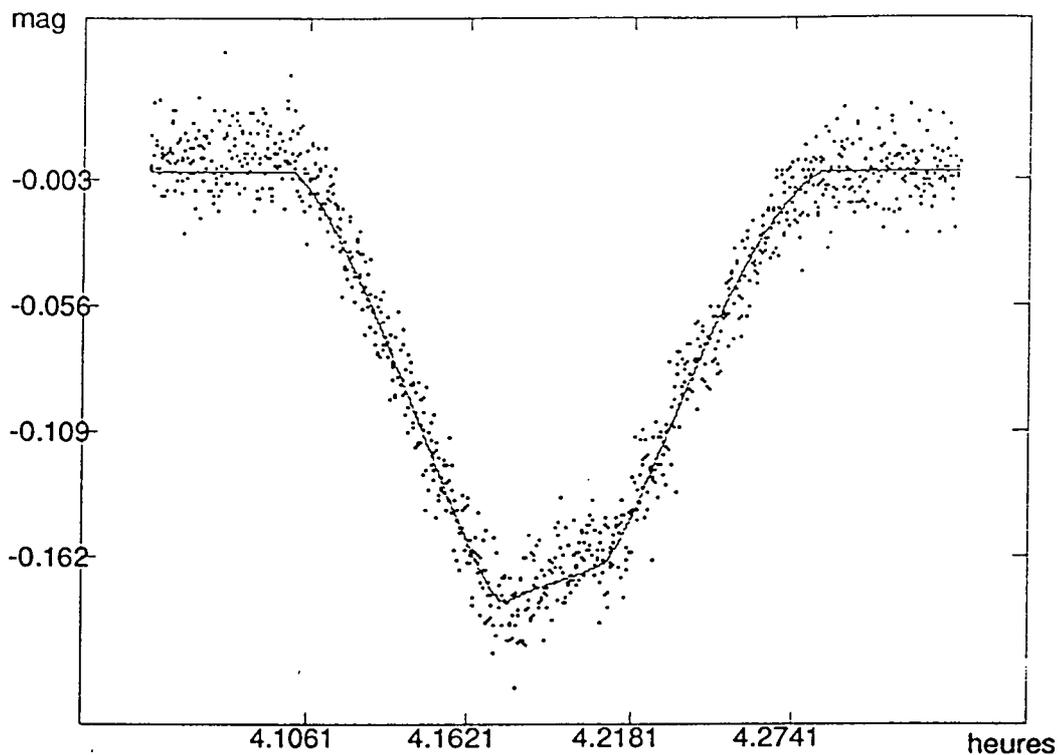


Figure 1. modélisation de l'occultation de Callisto par Europe du 29/5/1985

**Conclusion:**

Le modèle de phénomène mutuel construit est applicable à l'analyse de toutes les courbes des phénomènes obtenues pendant les précédentes campagnes. Il permettra d'améliorer l'analyse de ce type d'observation et probablement la précision des résultats astrométriques.

Il sera en particulier intéressant de le compléter par l'introduction de la non uniformité de surface des satellites due aux différences des terrains.

Les images CCD réalisées au Pic du Midi par F. Colas devraient permettre d'obtenir une cartographie suffisante pour prendre en compte les effets de surface principaux dans cette modélisation.

Un autre prolongement consistera en la simulation et l'analyse des observations infrarouges de phénomènes mutuels de Io pour lesquels on peut ainsi localiser les volcans observés par Voyager sur ce satellite

Références :

Aksnes, K., Franklin, F., Magnusson, P.: 1986, *Astron. J.*, **92**, 1436

Arlot, J.-E., Barroso Jr, J., Jablonsky, F.J., Quast, G.R.,  
Thuillot, W.: 1990, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **82**, 513

Ferrier, J.-F.: 1983, *Rapport de DEA*, Observatoire de Paris.

Thuillot, W., Morando, B.: 1990, *Note PHEMU91 n°1*.

## Analyse spectrale d'observations d'éclipses des satellites galiléens de Jupiter.

P. Descamps

Dans le cadre de mon stage de DEA au Bureau des Longitudes, j'ai effectué l'analyse spectrale d'observations d'éclipses des satellites galiléens de Jupiter. Ceci afin de trouver d'éventuels termes périodiques pouvant provenir soit d'une réduction des observations insuffisamment correcte soit de la théorie des mouvements des satellites elle-même.

L'analyse spectrale a été menée à partir d'un catalogue d'observations d'éclipses réunies par Lieske (1986). Ce catalogue est le plus important constitué jusqu'à maintenant, il se compose de près de 17000 observations s'étalant entre 1652 et 1983.

Les résidus ont été calculés à partir d'une théorie des mouvements (Lieske, 1978, 1980) et d'un modèle d'éclipses (Thuillot, 1989).

Cette analyse nous permet d'améliorer le modèle d'éclipse par une prise en compte des paramètres physiques liés à la topographie et à la texture de surface des satellites et pourrait nous apporter une meilleure connaissance des effets de l'atmosphère de Jupiter (réfraction, absorption, diffusion) et des mouvements des satellites.

### I - Catalogue d'éclipses de Lieske

Le catalogue d'éclipses réunies par Lieske est constitué de la donnée des instants des débuts et fins d'éclipses correspondant aux moments où l'intensité du satellite chute de moitié ("mid-event"). Ces mid-event ont soit été observés directement soit déduits par Lieske à partir de la connaissance des instants d'apparition ("first speck") et de disparition des satellites ("last speck").

Dans l'étude qui a été menée, nous nous sommes limités à des résidus qui n'excèdent pas  $\pm 600s$  (98 filtrage des observations douteuses signalées par Lieske lui-même a été opéré. Ceci nous mène à un total de 14627 observations disponibles réparties suivant les satellites comme suit:

- 7994 observations du satellite I (dont 3249 débuts d'éclipses et 4744 fins d'éclipses)
- 3749 observations du satellite II (dont 1518 débuts et 2230 fins)
- 2201 observations du satellite III (dont 1129 débuts et 1071 fins)
- 683 observations du satellite IV (dont 307 débuts et 375 fins).

### II - Analyse spectrale des résidus d'éclipses.

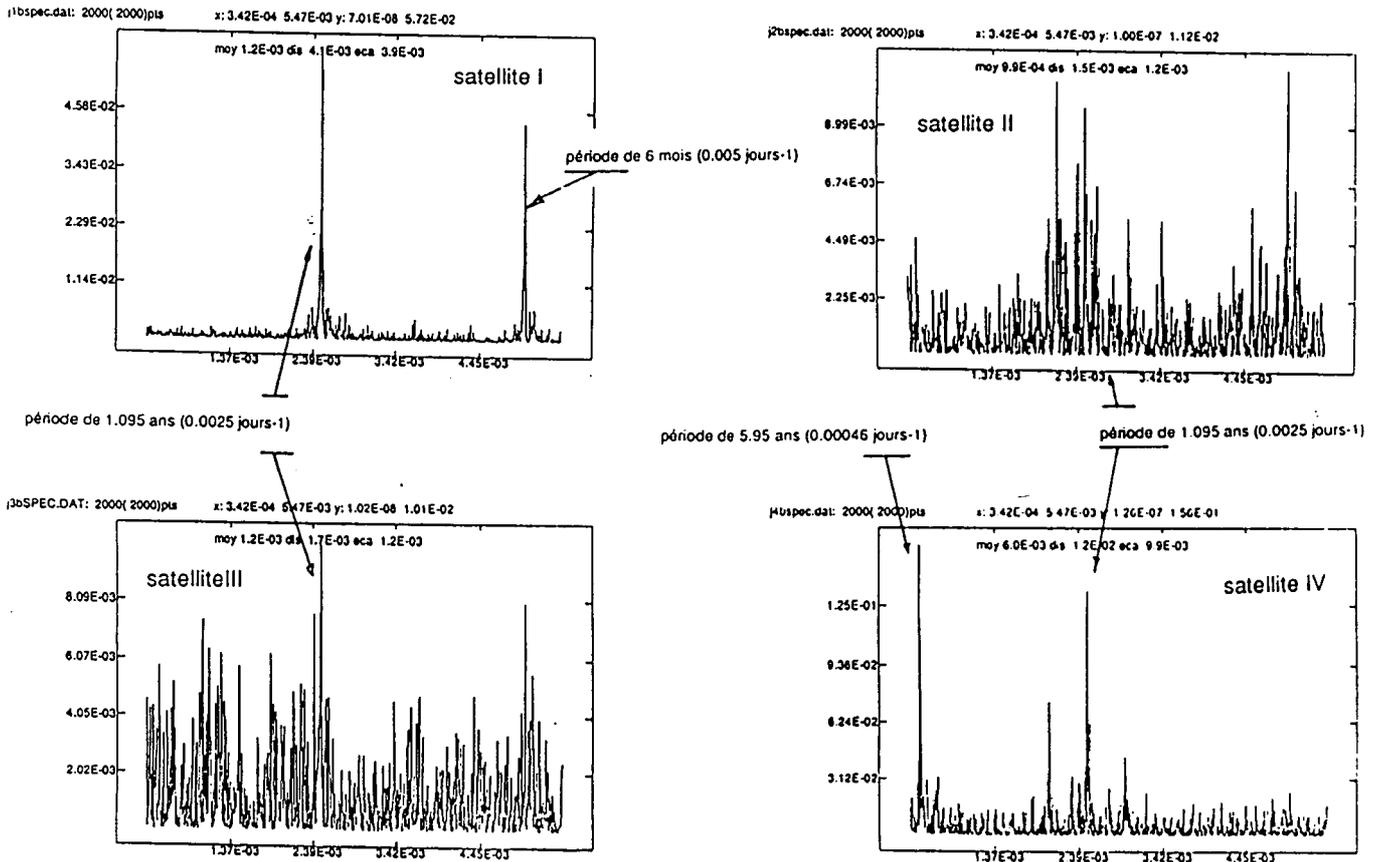
Pour mener une analyse spectrale par transformée de Fourier discrète (T.F.D), il faut disposer de données également espacées dans le temps, ce qui n'est pas le cas pour les résidus dont on dispose. En effet, tant pour des raisons d'origine astronomique qui tiennent à la configuration du système Terre-Soleil-Jupiter-satellite

que pour des raisons historiques les observations ne sont pas uniformément réparties dans le temps. C'est pourquoi nous avons utilisé une méthode développée par Ferraz-Mello (1981) adaptée à ce type d'observations.

Cependant l'analyse spectrale d'un signal non uniformément échantillonné dans le temps est source de difficultés importantes venant se superposer aux difficultés propres à l'analyse de Fourier discrète ("aliasing", périodisation du spectre).

Les principaux résultats obtenus sont les suivants:

- Mise en évidence d'une période de 1.095 ans, correspondant à la période synodique de Jupiter et présente sur chaque satellite, ainsi que de ses harmoniques.
- Mise en évidence d'une période de 5.95 ans correspondant à une demi période de révolution de Jupiter autour du soleil et apparemment uniquement présente sur les résidus du satellite IV.
- Possible détection de termes à très longue période, 280 ans sur les satellites I,II et III, supérieure à 400 ans sur le satellite IV et une située entre 120 et 140 ans sur l'ensemble des satellites. Cependant il convient de prendre ces périodes avec beaucoup de prudence compte tenu du fait que l'on est ici à la limite de ce que peut faire l'analyse spectrale étant donné que le catalogue d'observations dont on dispose s'étend sur 300 ans.



Analyse spectrale des résidus d'éclipses des satellites galiléens.  
les fréquences sont exprimées en jours moins 1.

### III - Interprétation des résultats.

- Période de 1.095 ans.

La présence de cette période dans les résidus d'éclipses détectée par l'analyse spectrale est sans doute due à un effet de la phase qui varie entre  $\pm 12^\circ$  en une révolution synodique. En effet, comme l'a déjà fait remarquer Aksnes (1986), la présence d'une phase et l'existence d'une loi d'albédo de la surface du satellite conduit à décaler le photocentre par rapport au centre géométrique d'une quantité d'autant plus importante que la phase est grande. Aksnes propose une même loi pour tous les satellites de variation linéaire du photocentre en fonction de la phase. Cependant les essais qui ont déjà été effectués pour tenter de faire disparaître ce terme périodique de l'analyse spectrale après ajustement des résidus à l'aide de la loi proposée par Aksnes montrent que celle-ci est insuffisante pour décrire l'effet de phase et que de plus une modélisation correcte doit intégrer des paramètres liés à la surface de chaque satellite.

- Période de 5.95 ans.

L'origine de ce terme périodique pourrait peut-être provenir du modèle d'éclipse utilisé. En effet, dans ce modèle, plusieurs phénomènes physiques ont été négligés qui - compte tenu du fait qu'à l'instar des anneaux de Saturne, le plan dans lequel se trouvent les quatre satellites galiléens semble osciller pour un observateur terrestre entre deux positions extrêmes atteintes tout les 5.95 ans - pourraient expliquer des décalages systématiques et périodiques dans la détermination théorique des instants de début et de fin d'éclipse. Ainsi, dans le modèle d'éclipse utilisé, la représentation actuelle du cône d'ombre s'appuyant sur Jupiter ne tient pas compte d'effets liés à l'atmosphère de Jupiter tels que l'absorption ou la réfraction. Ces effets, différents selon que l'on se place à l'équateur ou au pôle, induisent un cône d'ombre réel s'éloignant sensiblement du cône d'ombre géométrique théorique. Ceci provoque alors des décalages en temps d'autant plus importants que la trace de l'orbite du satellite dans un plan normal à la direction Terre-Jupiter est haute au dessus du plan équatorial. Ce qui pourrait expliquer que seuls les spectres du satellite IV fassent ressortir nettement la présence de cette période.

- Très longues périodes.

Compte tenu des réserves déjà émises à propos de l'efficacité de l'analyse spectrale dans ces domaines de périodes, il faut avancer ici avec beaucoup de prudence. Toutefois, si ces termes à très longue période existent vraiment dans les résidus ils sont sans doute imputables à la théorie des mouvements elle même.

Ainsi on peut remarquer que si l'on considère le terme de 279 ans visible sur les trois premiers satellites, on s'aperçoit que dans la théorie de Lieske (1977) un terme de 275 ans est présent sur le satellite IV seul (terme en  $-2\omega_4 + 2\psi$ ).

De même, dans cette théorie, il existe un terme de 490 ans uniquement présent dans les séries des trois premiers satellites et qui dans l'analyse spectrale ne semble apparaître que dans les résidus du satellite IV.

### IV - Conclusion et prospective.

L'analyse spectrale des résidus d'éclipses des satellites galiléens a mis en évidence de manière certaine la présence de périodes provenant d'insuffisances dans la réduction des observations par la non prise en compte d'effets physiques liés à la phase, à la surface des satellites et à l'atmosphère de Jupiter. Par contre, la présence de termes liés à la théorie des mouvements des satellites n'a pu être prouvée de manière sûre.

Actuellement, je continue avec W. Thuillot l'analyse de ces résultats et leur interprétation. Nous avons également analysés les résidus d'observations d'occultations (Fairhead, 1986, 1987) dans lesquels des périodes semblables ont été mises en évidence.

En ce qui concerne le terme de 1.095 ans et celui de 5.95 ans, nous procédons à des ajustements de modèles d'effet de phase et de modèles de cônes d'ombre qui, bien que n'ayant pas encore donnés pleine satisfaction, confirment la validité des hypothèses émises quant à l'origine des termes périodiques détectés.

De plus les résultats obtenus pour la correction de phase sont complémentaires des travaux en cours de modélisation de phénomènes mutuels puisqu'ils donnent une indication sur le choix d'un modèle de loi de diffusion de la lumière propre à chaque satellite et qu'ils donnent également des indications liées à la cartographie de la surface des satellites.

## OBSERVATIONS ASTROMETRIQUES DES PETITS CORPS DU SYSTEME SOLAIRE AVEC UNE CAMÉRA CCD.

F. Colas

### INTRODUCTION

---

L'arrivée des détecteurs à transfert de charge a permis un renouveau de l'astrométrie dans le système solaire. En effet, la raréfaction croissante des observations sur plaques photographiques et la grande précision des observations spatiales semblaient nous mener vers la fin de l'astrométrie au sol. Le développement d'une micro-informatique puissante allié à l'apparition des caméras CCD a permis de surmonter les lourdeurs des anciennes méthodes. Le gain le plus immédiat est sans doute l'augmentation du nombre des observations, ce qui implique indirectement une meilleure précision. Les méthodes de réduction ont également évolué, l'image est stockée sous forme numérique dès le début, la réalisation de logiciels spécifiques a permis d'augmenter la précision des mesures. Le seul inconvénient des ccd est la taille de la cible, cette spécificité nous a donc obligé à changer nos méthodes d'observation.

### OBSERVATIONS

---

La caméra ccd que nous utilisons est montée sur le télescope de 1 mètre du Pic du Midi. Les premières images prises en juin 1988 nous révélèrent toute la puissance de cette cible. En effet contrairement aux ccd astronomiques courants elle possède un système anti-éblouissement. Ce système nous pénalise un petit peu en sensibilité mais permet l'observation d'objets faibles proches d'objets très brillants. Nous avons ainsi pu faire des observations nécessitant d'habitude un coronographe comme celle de Miranda.

Dès septembre 1988, nous avons mis sur pied une campagne d'observation des satellites de Mars en vue de la mission spatiale Phobos. Le petit champ d'observation nous a obligé à observer systématiquement les deux satellites ensemble sans détermination du centre de la planète. De plus l'observation n'a pu s'effectuer que pendant des fenêtres relativement étroites. Cependant la vitesse d'acquisition et la précision des mesures se sont révélées suffisamment bonnes pour lancer de nouvelles campagnes d'observations.

L'opposition de Jupiter de novembre 1988 a confirmé les performances de notre caméra Ccd aliée à la très faible turbulence du Pic du Midi. En effet on a détecté facilement Thebe ( J XIV m = 16), ce satellite découvert par la sonde Voyager n'avait été observé qu'une seule fois depuis la terre. Cette fois ci le repère est donné par les satellites Galiléens. Avec l'opposition de 1989, cela fait environ 1000 positions pour Thebe et Amalthée.

L'opposition de Saturne, Uranus et Neptune de l'été 1989 a permis de réaliser une observation très difficile de Hélène ( S XII m = 19 ), c'est la première fois qu'on peut l'observer avec les anneaux aussi ouverts. Enfin une mission au Télescope de 2 mètres du Pic du midi a permis d'obtenir des positions des satellites de Uranus et de Triton. Le mauvais temps n'a pas permis de redécouvrir 89N1.

## RESULTATS

---

Le premier problème a été de calculer le centre des objets sur la matrice des pixels. Malgré le système anti-éblouissement, la présence d'une planète très brillante perturbe considérablement le fond de ciel. Cette lumière parasite est difficilement éliminable car elle provient de la diffusion des poussières sur les miroirs et de l'araignée de fixation du miroir secondaire. Nous avons développé un logiciel permettant d'ajuster le fond de ciel par des fonctions splines; en retirant cette fonction de l'image brute on obtient une image corrigée où l'on peut appliquer différents algorithmes de calcul de centrage. Le bruit de mesure avec un pixel de 0.3 seconde d'arc est de 0.05 ".

Le deuxième problème est le champ de l'instrument. Les champs astrométriques que nous utilisons ( environ 1' X 1' ) sont très rares. Les seuls objets utilisables sont les centres d'amas globulaires comme M15 ou M3. La mesure d'une trentaine d'étoiles permet ainsi de calibrer l'échelle et l'orientation du télescope. Nous avons eu des difficultés pour trouver des objets de calibrations proches des satellites. La précision de 0.05" n'a pas pu être atteinte, la première réduction nous a donné un rms sur les O-C d'environ de 0.2". Les problèmes semblent venir du fait que le télescope n'est pas astrométrique, c'est à dire qu'il fléchit beaucoup et qu'il est sensible aux variations de température. Nous avons donc essayé d'ajuster un angle de rotation et une échelle pour l'ensemble des observations des satellites de Mars. La précision est restée encore médiocre. Nous avons ensuite décidé d'ajuster une rotation et une échelle par nuit d'observation. Le rms des O-C est passé alors à 0.1". Il semble difficile de faire mieux avec cette instrumentation.

## PERSPECTIVES

---

Les positions obtenues de Thebe et de Amalthée sont suffisantes pour établir une nouvelle théorie de leurs mouvements. La théorie actuelle de Thebe se réduit à une orbite circulaire. La nouvelle théorie permettra d'ajuster quelques paramètres physiques comme les termes du potentiel de Jupiter ou le freinage dû aux particules de la magnétosphère.

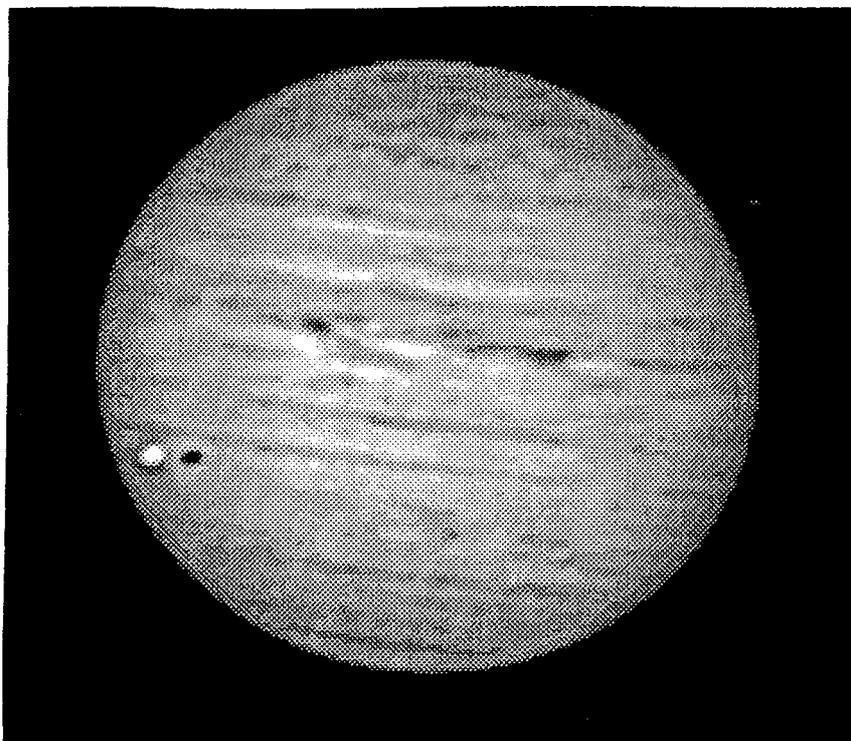
La redécouverte de comètes périodiques et l'observation des astéroïdes est également prévue.

Les fenêtres d'observation étant étroites, nous avons partagé la plupart de nos missions avec des planétologues. Nous continuerons dans l'avenir cette coopération fructueuse qui a permis d'obtenir des images de qualité inégalée de Mars et de Jupiter.

L'imagerie à très haute résolution des satellites Galiléens sera poursuivie pour permettre de mieux interpréter les courbes de lumière des phénomènes mutuels.

Le maillon faible de nos mesures étant les objets de calibration, nous envisageons une coopération avec l'U.S.N.O. pour fabriquer des catalogues de grande précision astrométrique. Nous espérons pouvoir utiliser le télescope Strand de Flagstaff.

L'instrumentation actuelle du Pic du Midi est un prototype, nous allons lancer la fabrication d'une série de caméras ccd pour les observatoires de Bordeaux, Meudon, Paris et de l'OHP.



JUPITER le 31 décembre 1989 0H 30 UTC

CCD T1M Pic du Midi

EPHEMERIDES DES SATELLITES NATURELS DES PLANETES  
CENTRE DE DONNEES ASTROMETRIQUES SUR LES SATELLITES

J.-E. Arlot

**Ephémérides des satellites naturels**

Depuis quelques années, nous publions les éphémérides des principaux satellites naturels des planètes qui sont appelées à évoluer dans l'avenir. Nous allons tout d'abord en retracer l'historique. Dans l'ancienne "Connaissance des Temps", on trouvait les configurations des satellites galiléens de Jupiter, leurs phénomènes et un algorithme assez complexe permettant d'obtenir leurs positions par rapport à Jupiter. Tout cela était dû à une tradition ancienne: ces satellites ont toujours été très faciles à observer, en particulier leurs phénomènes.

En 1978, la Connaissance des Temps a changé de forme. Grâce à la généralisation des calculatrices de poche, les éphémérides ont été données sous forme de coefficients de Tchebycheff. Les satellites galiléens ont bénéficié de cette représentation. Malgré un volume important de coefficients à publier, le gain en précision était net. Les phénomènes et les configurations des satellites galiléens disparurent dans la nouvelle "Connaissance des Temps" et cela nous a amené à créer un "Supplément à la Connaissance des Temps" qui contenait les phénomènes (décrits plus en détail), les configurations (améliorées par la possibilité de lire sur le diagramme l'ascension droite et la déclinaison différentielle par rapport à Jupiter avec une précision de quelques secondes de degré) et une méthode de calcul des phénomènes de l'année suivante à partir de coefficients.

La situation a encore évolué par la suite :

- en 1980, la Terre est passée dans le plan des anneaux de Saturne : les observateurs ont donc eu la possibilité d'observer de nouveaux satellites de cette planète. Pour cela, il était impératif de pouvoir positionner très précisément les satellites connus pour identifier les nouveaux. On nous a alors demandé des éphémérides faciles à utiliser pendant les observations. La programmation réalisée par D.T. Vu pour la représentation des éphémérides des satellites galiléens a été appliquée avec succès aux 8 premiers satellites de Saturne (à partir de la théorie de leur mouvement due à Kozai et Rapaport). Cela a permis la découverte du satellite Hélène.

- en 1985, à la suite des travaux de J. Chapront et D.T. Vu, une nouvelle représentation sous forme de fonctions mixtes est venue concurrencer les coefficients de Tchébycheff : cette représentation était non seulement très facile à utiliser (simple fonction du temps) mais encore elle nécessitait moins de coefficients pour une même précision comme le montre le tableau de comparaison ci-après.

Nombre de coefficients nécessaires pour représenter une année

Représentation	Io	Europe	Ganymède	Callisto	Mimas	Encelade	Tethys	Dione	Rhée	Titan	Hyperion	Japel
Tchebycheff	5880	2928	1472	992	12410	6570	5840	3294	2196	828	828	414
Fonctions mixtes	1710	1710	864	864	3680	480	480	480	480	576	768	288

La construction de ces fonctions mixtes est plus délicate que celle des polynômes de Tchébycheff du fait qu'il n'y a pas de règle particulière pour arriver à une précision donnée.

A la suite de ce changement de représentation, il a été possible de réunir dans un même ouvrage les éphémérides des satellites galiléens de Jupiter, des huit premiers satellites de Saturne et des cinq satellites d'Uranus (théorie de Ch. Veillet). Cet ouvrage dénommé également "Supplément à la Connaissance des Temps" a été publié par les Editions de Physique" à partir de 1986. Il a cependant encore été amené à évoluer:

- introduction de nouvelles théories (Dourneau pour les satellites de Saturne, Laskar-Jacobson pour les satellites d'Uranus).
- introduction des satellites de Mars (théorie de M. Chapront).
- changement des repères (passage au repère J2000 comme souhaité par l'UAI).
- publication d'un nouveau "Supplément" contenant certains petits satellites de Jupiter et de Saturne et dû à A. Borsenberger et P. Rocher.
- distribution d'une diskette avec l'ouvrage, donnant les éphémérides d'une manière interactive (due à Ch. Ruatti).

Dans l'avenir, d'autres évolutions sont envisagées :

- ajout de nouveaux satellites (en particulier ceux de Neptune).
- intégration de ces éphémérides dans une grande "Connaissance des Temps".

### Projet d'un centre de données sur les satellites

Les satellites naturels des planètes sont, de plus en plus, un sujet d'étude pour les théoriciens et les observateurs. Une enquête que j'ai menée il y a peu dans le cadre de l'UAI a montré que les membres de l'UAI s'intéressant aux satellites naturels se répartissaient comme suit :

	observateurs astrométristes	travaux théoriques, ajustement des constantes	Utilisateurs d'éphémérides		Total
			Planetologie	Astrométrie	
Satellites de Mars	4	3	3	2	12
Satellites galiléens de Jupiter	22	10	13	17	62
Satellites faibles de Jupiter	5	4	1	4	14
Huit premiers satellites de Saturne	18	12	11	17	58
Satellites faibles de Saturne	3	3	0	7	13
Satellites d'Uranus	10	5	5	4	24
Satellites de Neptune	8	3	4	3	18
Satellite de Pluton	3	1	2	1	7
Nombre d'astronomes concernés					

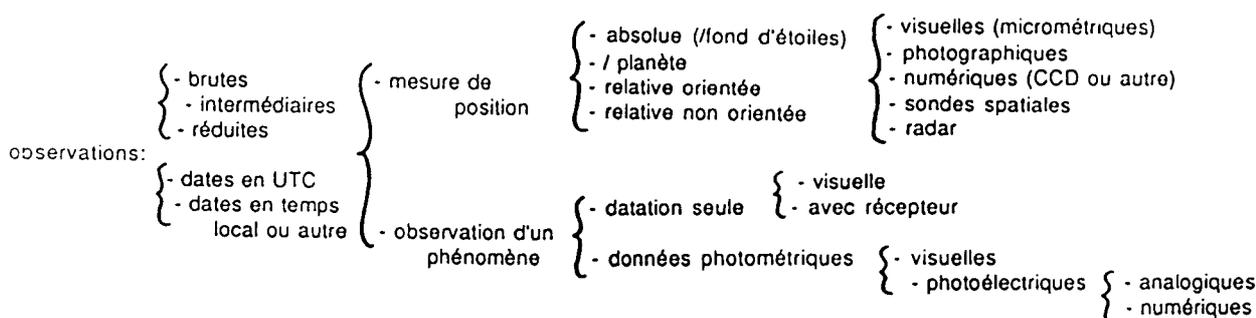
On est frappé par le nombre relativement important d'une part des théoriciens étudiant la dynamique de ces corps et d'autre part des observateurs de leurs positions. Cela montre l'intérêt de la centralisation des données observationnelles astrométriques afin de les rendre disponibles à tous les théoriciens souhaitant construire des éphémérides ou ajuster des constantes d'intégration.

Bien que les satellites naturels soient étudiés depuis de nombreuses années, il est à noter que le problème de la collecte des observations ne se pose que depuis peu : jusqu'à présent, la plupart des travaux utilisant des observations se sont limités à des séries homogènes effectuées dans un but précis. A ces séries, on ajoutait quelques vieilles observations pour augmenter la durée de validité de la théorie, mais il ne paraissait pas souhaitable de disposer de trop de séries d'observations, trop disparates pour les raisons suivantes :

- un ensemble homogène d'observations simplifiait les problèmes liés à la pondération et au traitement des données lors de l'ajustement de constantes ;
- un ensemble trop important d'observations n'était pas analysable vu les faibles capacités de calcul dont on disposait.

Les progrès réalisés par les moyens de calcul et les inconvénients liés à la limitation des données d'observation analysées incitent maintenant à une recherche exhaustive des observations effectuées. La commission 20 de l'UAI m'a demandé d'étudier la possibilité de création d'un centre de données rassemblant ces observations et les mettant à la disposition de quiconque le souhaite.

Le rôle d'un tel centre consisterait tout d'abord à centraliser les observations effectuées actuellement, à les répertorier, les documenter, à créer des fichiers de données homogènes, à publier des catalogues et aussi à donner une appréciation sur la qualité de telle ou telle série d'observation (à partir d'(O-C) par exemple). Il reste bien entendu à définir la nature des données stockées : données brutes ou données réduites. Un tel centre pourrait entreprendre ultérieurement la collecte d'observations anciennes pour les intégrer aux données plus récentes. Le diagramme suivant montre la diversité des types d'observations que l'on rencontre :



Pour terminer, je voudrais signaler le travail de recherche bibliographique effectué il y a quelques années par Y. Jannot. Un travail considérable a été effectué. La partie concernant les satellites galiléens a été informatisée (en particulier par V. Raoult en ce qui concerne les occultations par Jupiter) et constitue ainsi une base de départ pour un centre de données. Il est souhaitable qu'un tel travail soit continué.

## DIFFUSION DE RENSEIGNEMENTS

PAR MINITEL

*Germaine Satre*

Pour concrétiser le projet de Diffusion de renseignements astronomiques par MINITEL, une *étude* de recherche de logiciel d'aide à la fabrication d'application Videotex a été menée sur plusieurs types de matériel: micro, mini, gros ordinateurs.

Le choix de AVX et GTMOSI ,logiciels IBM, découle des résultats de cette étude.

La *répartition des tâches* entre Producteur de Service -fournisseur de l'information- et Serveur -hébergement des services- est la suivante:

- sur micro IBM-PS/2 en local: le logiciel AVX/PS utilisé par le producteur du service: B.D.L. pour la mise au point de l'application.

- sur un ordinateur IBM/370 les logiciels GTMOSI et AVX/GTMOSI gérés par le CIRCE pour l'hébergement du service.

Nous sommes maintenant dans la *phase active de développement* de l'application Videotex.

Le matériel est en place et les logiciels nécessaires installés du côté BDL comme du côté CIRCE.

Un groupe de travail s'est constitué afin de :

- déterminer les pôles de développements sur les thèmes pouvant constituer ce Service,

- décrire la structure et les cheminements de l'arborescence du service,

- préciser la source des informations, les variables nécessaires,
- répertorier les programmes et fichiers existants et leur utilisation,
- en fin établir un dossier structurel ou cahier des charges par thème envisagé.

La *responsabilité technique*, assurée par G.SATRE (chef de projet) recouvre l'organisation des réunions de travail, l'harmonisation des tâches, les tests et contrôles techniques, les interfaces videotex minitel-programmes de calcul, consultations de fichiers, les transmissions vers le serveur et les relations CIRCE.

Le *suivi scientifique*, assuré par P.ROCHER concerne la cohérence des thèmes, leur organisation dans une arborescence générale, la validation des résultats de traitements.

Chaque thème est pris en charge par une personne ou une équipe qui conduit les travaux nécessaires à sa réalisation.

Nous devrions, courant avril, déterminer les *calendriers* de mise en oeuvre - phase test puis phase production - pour ce nouveau Service.

## LES PUBLICATIONS L. BERGEAL

Le Bureau des Longitudes publie annuellement 4 ouvrages et assure le contrôle d'un 5e: les éphémérides aéronautiques.

### 1 - La Connaissance des Temps.

Imprimé jusqu'en 1979 chez Gauthier-Villars et distribué par Dunod-Bordas, cet ouvrage est, depuis cette date, sous une forme complètement remaniée, imprimé au Service Hydrographique et Océanographique de la Marine à Brest. De 1979 à 1985, Dunod-Bordas a continué de s'occuper de la distribution. Depuis 1986 nous l'assurons nous-même en faisant un mailing avec des bons de commande qui, expédiés à Brest, sont honorés par l'envoi en retour d'un ou plusieurs exemplaires de l'ouvrage.

G. Francou a écrit un programme de calculs d'éphémérides sous forme de coefficients de Tchebychev qui - exploité chaque année - génère une bande magnétique à partir de laquelle le SHOM imprime automatiquement les tableaux numériques. La partie texte de l'ouvrage est actualisée chaque année.

Actuellement le Bureau des Longitudes, qui reçoit 200 exemplaires gratuits par an, consacre 26 000 F de son budget annuel à cette publication - 58 000 F de frais de fabrication minorés du prix de cession de l'ouvrage, ainsi en 1988, 160 exemplaires ont été vendus au prix de 200 F - Ce coût de 26 000 F est à rapprocher des 60 000 F de subvention que le Bureau avait versé à Gauthier-Villars pour la dernière des éditions (1979) imprimée par ses soins.

Nous nous préoccupons de trouver un nouvel éditeur qui assurerait la diffusion de cet ouvrage qui souffre sans nul doute d'une mauvaise distribution : deux maisons démarchées nous ont répondu positivement. Il s'agit des Editions de Physique et de Masson. Nous ferions alors une sortie en TEX de l'ouvrage (les tableaux numériques réalisés par J.L. Simon sont prêts, il reste cependant à préparer la partie texte). Il suffirait à l'éditeur de les cliquer. Celui-ci ne nous verserait pas de droit d'auteur étant donné le faible tirage -500 exemplaires - Nous n'aurions toutefois pas de subvention à lui verser.

Cependant, nous attendons pour donner suite à ce projet, de préciser la nouvelle présentation que nous entendons donner à la Connaissance des Temps.

J.E. Arlot, G. Francou, J.L. Simon et moi-même en avons déjà débattu : on envisagerait une Connaissance des Temps en deux tomes, un permanent textes et tables, qui reste à concevoir, et un d'éphémérides annuelles.

La CDT est enrichie des Suppléments mis au point par les Galiléens :

### 2 - Suppléments à la Connaissance des Temps.

**- Les Ephémérides des Satelllites de Jupiter, Saturne et Uranus.**

Imprimés et édités par les Editions de Physique qui clichent les manuscrits ils sont accompagnés d'une version sous forme de disquettes. Cette année 80 exemplaires en ont été vendus au prix de 150 F.

Cette publication coûte annuellement 3000 F au BDL, prix des 20 exemplaires que nous achetons à l'éditeur pour un service gratuit à des observatoires.

**- Les éphémérides des satellites faibles de Jupiter et Saturne,**

**- Les configurations des huit premiers satelllites de Saturne,**

**- Les phénomènes et configurations des satellites galliéens de Jupiter.**

Ces 3 derniers ouvrages de 60 pages environ sont réalisés au Bureau des Longitudes à partir de photocopies de sortie d'imprimante. Ils sont vendus au prix de 40 F ou 45 F. Environ, par an, 80 exemplaires sont vendus et 80 sont offerts. Il est envisagé d'intégrer au tome d'éphémérides annuelles de la Connaissance des Temps les éphémérides des satellites de Jupiter, Saturne et Uranus.

### **3 - Les Ephémérides Astronomiques.**

Ces éphémérides étaient imprimées jusqu'à l'édition 1988 par Dunod-Bordas. Les problèmes de qualité d'exécution et de délai de réalisation nous ont fait quitter cet éditeur. Les éditions 1989 et 1990, réalisées par Masson, nous ont donné toute satisfaction.

L'essentiel de l'ouvrage est composé à partir de manuscrits, résultats d'exploitation de programmes écrits par P. Rocher, G. Francou et l'équipe des Galiléens.

Pour 1989 le tirage a été de 7000 exemplaires, 4500 pour la Société Astronomique de France à un prix préférentiel et 1600 exemplaires vendus à 150 F. Les éditions Masson nous intéressent à la vente de cet ouvrage qui nous coûtait encore 8000 F de frais de dessin pour l'édition 1986 chez Dunod Bordas.

Actuellement P. Rocher a entrepris de sortir en TEX les tableaux numériques de l'ouvrage, évitant ainsi la saisie manuelle des manuscrits. Il reste encore un travail important de saisie de la partie texte.

Nous nous posons la question de l'opportunité d'adjoindre à cette publication une disquette dont il resterait encore à définir son contenu.

#### 4 - Les Ephémérides Nautiques.

Ouvrage annuel à l'usage des marins édité chez Dunod Bordas. Cet ouvrage à une vente qui décroît annuellement : de 6000 exemplaires en 1978, elle est passée à 4500 en 1986 pour atteindre 2500 exemplaires pour l'édition 1988. La concurrence est importante, ces éphémérides sont mal distribuées et trop chères (230 F). L'ouvrage est imprimé à partir d'une bande magnétique générée par les programmes mis au point par G. Francou et moi-même.

Cet ouvrage ne coûte ni ne rapporte rien au Bureau des Longitudes, nous sommes cependant préoccupés par la recherche d'un nouvel éditeur qui en assurerait une meilleure promotion.

- **L'Encyclopédie du Bureau des Longitudes** occupe une place à part dans nos publications.

Elle était écrite par d'éminents spécialistes et réalisée sous la responsabilité du Bureau des Longitudes. Elle comportait 4 tomes publiés entre 1977 et 1988 :

la Terre, les Eaux, l'Atmosphère,  
les Etoiles, le Système solaire,  
la Galaxie, l'Univers extragalactique,  
la Physique.

Les 3 premiers de ces ouvrages ont fait l'objet d'une seconde édition actualisée. La dernière parution date de 1988. Prix moyen 270 F.

C'est seulement à partir de 1987 que cet ouvrage n'a plus coûté d'argent au Bureau des Longitudes qui l'a longtemps subventionné. Cependant A. Borsenberger et N. Baron ont, jusqu'en 1988 consacré beaucoup de temps à sa réalisation entre des auteurs insaisissables et un imprimeur incompetent.

Les éditions Dunod-Bordas ne désirant pas poursuivre une publication qu'ils considéraient - à juste titre - comme déficitaire et la rédaction de la 2e édition du tome de physique rencontrant quelques difficultés, l'encyclopédie s'arrêta là.

Désormais une nouvelle forme d'encyclopédie va voir le jour sous le titre des "Cahiers des Sciences de l'Univers" édités sous l'égide du Bureau des Longitudes. Il s'agira d'ouvrages de 120 pages environ ne traitant qu'un seul sujet voire deux par cahier avec une fréquence de parution annuelle de deux numéros environ.

Nous avons passé contrat avec les éditions Masson - le premier numéro de cette collection doit paraître d'ici la fin de l'année - Chaque auteur devra remettre son manuscrit à l'éditeur sous forme de disquette ce qui allégera considérablement le rôle du Bureau des Longitudes.

La sortie des 3 ouvrages CDT, éphémérides astronomiques et éphémérides nautiques a lieu vers juin-juillet de l'année A-1 qui précède celle des éphémérides publiées. Les manuscrits sont remis à l'imprimeur en octobre-novembre de l'année A-2. Les épreuves des 3 ouvrages sont reçues par le Bureau des Longitudes en début d'année pour être restituées à l'imprimeur en bons à tirer dans les 3,4 mois qui suivent afin d'en assurer la sortie avant les vacances d'été. Les éphémérides sont ainsi en vente dans les 6 mois qui précèdent leur date d'utilisation.

Un groupe de correcteurs assure le contrôle des épreuves : Mmes Sainson, Raoult, Baron, Derouazi et M. Jourdain. Depuis deux ans sont associés à ce travail, Mme Bonnaventure et M. Heurtier.

Il faut mentionner une publication exceptionnelle du Bureau des Longitudes en juin 1989 :

**- *Le Calendrier Républicain.***

Le 15 juin 1989 paraissait cet ouvrage réalisé à partir de nos archives par J .E. Arlot, Th. Derouazi, B. Morando, P. Rocher et moi-même.

Réalisé par un petit imprimeur qui se substituait à l'imprimerie de Meudon défailante, il a été imprimé à 1000 exemplaires et est vendu par l'Observatoire de Paris au prix de 58 F.

La vente de cet ouvrage a sans doute pâti de sa sortie trop tardive dans l'année du bicentenaire et de son absence de promotion. Actuellement 470 exemplaires ont été vendus. Un contrat a été passé avec l'Observatoire de Paris qui, éditeur de notre ouvrage, s'est engagé à nous verser 20% de droits d'auteur par exemplaire vendu hors taxe..

## RENSEIGNEMENTS

Le Service des renseignements du Bureau des Longitudes fonctionne depuis un an sous la responsabilité de P. Bretagnon successeur de Colette Edelman qui en avait assuré le fonctionnement durant 14 années. Participent à la fourniture de renseignements le secrétariat : M. Bonnaventure, M. Heurtier, et moi-même.

De nombreuses demandes téléphoniques sont reçues par le secrétariat. Certaines d'entre elles sont immédiatement satisfaites : soit par simple lecture de documents, soit par l'exécution sur micro de programmes permettant d'établir rapidement heures de levers et couchers de Soleil pour date et lieu déterminés. Les demandes pointues sont dirigées vers le spécialiste idoine du Service.

Nous avons reçu durant l'année 1989 350 demandes (il s'agit de demandes grand public excluant les professionnels auxquels répond G. Francou). Sur ces 350 demandes 140 d'entre elles ont été satisfaites par le secrétariat, les 210 autres ont fait l'objet d'un courrier de P. Bretagnon ou moi-même.

L'ensemble des demandes de renseignements est constitué :

- . 33% de demandes ponctuelles du type : heures de lever et coucher de Soleil ou Lune, la détermination du jour de la semaine, les phases de la Lune, les calendriers... Elles émanent d'un public hétérogène pour lequel nous n'avons qu'une courte réponse à fournir.

- . 15% de ces demandes sont le fait de fabricants de calendriers

- . 15% de producteurs de films.

Nous avons, pour ces deux types de correspondants, adopté la politique suivante : au-delà d'une fourniture d'une dizaine de photocopies extraites de notre ouvrage les "Ephémérides Astronomiques" nous invitons notre interlocuteur à acheter notre publication.

- . 10% sont des demandes d'éphémérides que nous fournissons sous forme de bandes magnétiques ou listings.

Nous recevons également des demandes de formulaires dans certains cas via les clubs d'amateurs d'astronomie mais aussi d'informatique. Nous avons aussi expédié plusieurs fois la note scientifique d'ELP2000.-85 mais aussi des listings de VSOP87 mais nous sommes restés fermes dans notre refus de vérifier les calculs réalisés par nos correspondants à partir de nos formulaires.

Demands également des architectes pour des calculs d'ensoleillement, demandes en vue de la constitution d'un dossier pour action en justice (détermination d'heures de lever ou coucher du Soleil).

Une partie de ces demandes émane d'organismes officiels. Nous en avons dénombré 22 différents au cours de l'année 1989 : CNRS, facultés (certaines étrangères), ministères, instituts, ambassades, agences nationales, laboratoires, centres d'études techniques de l'équipement, Muséum d'histoire naturelle, centre d'océanologie, documentation archéologique...

D'autres sont le fait de particuliers dont le sérieux de la demande nous incite à y apporter toute notre attention - les historiens en particulier . Nous devons alors constituer un vrai dossier, ce qui nous entraîne à y consacrer un temps non négligeable de réflexion, de compilation puis d'exploitation de programmes informatiques existants (programme EPHER de G. Francou) ou l'écriture de programmes spécifiques.

## HISTOIRE DE L'ASTRONOMIE PUBLIEE PAR L'UAI

B. Morando

L'Union Astronomique Internationale a entrepris une Histoire Générale de l'Astronomie (General History of Astronomy) dont un volume a déjà paru. Le comité de rédaction est composé de M. Hoskin (Université de Cambridge, Angleterre), O. Gingerich (Harvard), O. Pedersen (Aarhus, Danemark) et C. Wilson (St John's College, Annapolis, Etats-Unis) qui a remplacé R. Taton après son départ à la retraite.

Le volume 2-B s'appelle Planetary Astronomy from the Renaissance to the rise of Astrophysics. Il est placé sous la responsabilité de Il comprend d'abord trois chapitres qui traitent des débuts de la théorie newtonienne de la gravitation, de la mécanique céleste au dix-huitième siècle : Euler, Clairaut, d'Alembert, Lagrange, Laplace (B.Morando, en cours) et de l'astronomie d'observation et des applications de la théorie pendant le dix-huitième siècle (découverte d'Uranus, passages de Vénus etc.).

Vient un chapitre sur L'âge d'or de la mécanique céleste de Laplace à Poincaré que j'ai rédigé. En voici le plan :

Introduction - Equations et solutions (Travaux de Hamilton, Jacobi, développement de la fonction perturbatrice, résolution des équations du mouvement) - La découverte de Neptune - Les théories du mouvement de la Lune (Avant Delaunay, Delaunay, Hill et Brown) - Les satellites des planètes - Les théories planétaires ( Travaux divers, Le Verrier, Newcomb et Hill) - Autres travaux ( Les petites planètes, les comètes, passages de la comète de Halley de 1835 et de 1910) - Deux "petites difficultés" (L'avance du périhélie de Mercure et l'accélération séculaire de la Lune) - L'œuvre de Poincaré - Conclusion et bibliographie.

Un dernier chapitre concerne les applications de la mécanique céleste au dix-neuvième siècle : intégration numérique, éphémérides lunaires et planétaires (B. Morando, en cours), éphémérides des satellites.

Il est à noter que cet ouvrage est l'œuvre d'historiens des sciences mais aussi d'astronomes puisque, outre moi-même y participent Y. Kozai et B. Marsden.

## CONDORCET ET LA MECANIQUE CELESTE

Michelle Chapront-Touzé et Bruno Morando

Cette étude a été effectuée dans le cadre d'un séminaire pluridisciplinaire suivi d'un colloque sur Condorcet, organisé par l'équipe REHSEIS du CNRS de 1986 à 1988.

Les travaux de Condorcet en mécanique céleste sont peu connus et représentent une part mineure de son oeuvre scientifique. On les trouve essentiellement dans les quatre mémoires suivants :

- "Du problème des trois corps", Paris, 1767;
  - "Mémoire sur les équations différentielles", *M.A.R.S.* pour 1770, Paris, 1773;
  - "Réflexions sur les méthodes d'approximation connues jusqu'ici pour les équations différentielles", *M.A.R.S.* pour 1771, Paris, 1774;
- "Essai sur les comètes" in "Dissertations sur la théorie des comètes", Utrecht, 1780;  
et dans un mémoire inédit qui figure parmi les archives du Bureau des Longitudes :
- "Examen de la question analytique: Si la force d'attraction a pu produire celle de projection" [1774].

Les trois premiers mémoires se rattachent aux travaux de Condorcet sur le calcul intégral et les équations différentielles et adoptent un point de vue entièrement théorique. Le mémoire sur les comètes a partagé, avec un mémoire de Tempelhoff sur le même sujet, le prix de l'Académie de Berlin pour 1778. D'un esprit moins théorique que les travaux précédents, il ne comporte malgré tout aucune application à une comète particulière. Le mémoire inédit s'oppose à la théorie cosmogonique de Buffon et propose une hypothèse voisine de celle de Kant.

Même si l'intérêt de Condorcet pour certains problèmes témoigne d'un souci de rigueur original, la confusion qui règne le plus souvent dans ses démonstrations et dans ses calculs rend ses travaux de mécanique céleste difficilement utilisables et explique l'oubli dans lequel ils sont tombés.

### Publications

Chapront-Touzé, M.: 1989, "Condorcet et le problème des trois corps" in "Condorcet, mathématicien, économiste, philosophe, homme politique", P. Crépel et C. Gilain éditeurs, Minerve, Paris, pp. 29 à 35.

Morando, B.: 1989, "Les travaux de Condorcet sur les comètes" in "Condorcet, mathématicien, économiste, philosophe, homme politique", P. Crépel et C. Gilain éditeurs, Minerve, Paris, pp. 36 à 43.

