

ISSN 1621-3823
ISBN 2-910015-51-3

*NOTES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES
DE L'INSTITUT DE MÉCANIQUE CÉLESTE*

S087

**JOURNÉES SCIENTIFIQUES 2006
DE L'INSTITUT DE MÉCANIQUE CÉLESTE ET
DE CALCUL DES ÉPHÉMÉRIDES**



INTRODUCTION

Depuis 1990, l'Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides organise des Journées scientifiques avec une période de deux ou trois ans. Les dernières Journées scientifiques s'étaient tenues en 2003 et l'avancement de différents travaux a favorisé la tenue de nouvelles Journées scientifiques les 5 et 6 juin 2006. Ces réunions permettent aux personnels chercheurs, ingénieurs et techniciens d'exposer des travaux achevés mais aussi ceux en chantier ou de décrire un projet. Ces présentations se font devant le laboratoire et quelques invités extérieurs, sans le formalisme inhérent à un colloque international.

Les objectifs sont principalement de favoriser la communication d'informations scientifiques ou techniques, de faire le point de programme de recherche ou de développements techniques en cours, de concentrer en deux jours un nombre appréciable d'échanges qui ne trouvent pas toujours place dans le déroulement quotidien de ces activités. On peut ainsi apprécier la progression de certains travaux. On peut également voir l'émergence de nouveaux thèmes, notamment ceux, porteurs d'avenir, développés par des doctorants ou de jeunes chercheurs. A ce titre, les Journées scientifiques 2006 ont été un succès puisque plus de 40 communications ont pu être faites à travers des présentations structurées dans le cadre des thèmes de recherche de l'IMCCE ou autour de certaines activités opérationnelles du laboratoire.

Le lecteur trouvera ainsi dans ce fascicule non pas un compte rendu de colloque, mais celui d'un atelier vivant. Il aura ici un cliché instantané des activités techniques et scientifiques principales de l'IMCCE pour 2006. Nous espérons qu'il en appréciera la diversité, l'originalité et la qualité.

W. THUILLOT

Directeur de l'Institut de mécanique céleste
et de calcul des éphémérides

TABLE DES MATIÈRES

Où était Amerigo Vespucci le 23 août 1499 ?	9
<i>P. Rocher</i>	
Les polygones déchaînés et le problème des n corps	15
<i>A. Chenciner et Jacques Féjóz</i>	
La structure résonante des Troyens de Jupiter et quelques conséquences	
<i>Ph. Robutel (texte non communiqué)</i>	
Missions : la réglementation	19
<i>I. Nicolas</i>	
Nouvelles versions des éphémérides des satellites naturels	23
<i>N. Emelianov, M. Varfolomeev</i>	
Étude du système martien par la dynamique des satellites Phobos et Deimos	29
<i>V. Lainey</i>	
La formation permanente : une nécessité indispensable à la mise en œuvre des qualifications	31
<i>A. Montintin</i>	
Étude de la fragmentation des comètes	
<i>F. Colas, J. Vaubaillon (texte non communiqué)</i>	
Formation et évolution des glaciers martiens.....	
<i>B. Levrard, F. Forget, F. Montmessin, R.M. Haberle, J.W. Head (texte non communiqué)</i>	
Tests de la relativité avec les observations Gaia des astéroïdes	33
<i>D. Hestroffer</i>	
Les métiers de l'édition : étude d'un cas particulier.....	37
<i>S. Lemaître</i>	
Les différents types de théories du mouvement des corps du système solaire.....	41
<i>A. Vienne</i>	
Le système double d'Antiope.....	45
<i>P. Descamps, F. Marchis, T. Michalowski, F. Vachier, F. Colas, J. Berthier, D. Hestroffer, M. Assafin, P. Dunkel, K. Miller, M. Polinska, P. Wojciech, R. Vieira-Martins, M. Birlan, J.-P. Teng-Chuen-Yu, A. Peyrot, B. Payet, J. Dorseuil, Y. Léonie, T. Dijoux</i>	
Observations astrométriques de Pluton – Le problème du photocentre	51
<i>R. Vieira Martins, A.H. Andrei, M. Assafin, P. Descamps</i>	
Évolutions de TRIP	57
<i>M. Gastineau</i>	

Informations sur l'Hygiène et la Sécurité	61
<i>L. Touchet</i>	
Analyse en fréquence de haute précision, appliquée aux mouvements des satellites galiléens de Jupiter	65
<i>L. Duriez</i>	
L'inégalité de De Haerdtl : une richesse dynamique insoupçonnée dans le système des satellites galiléens	71
<i>B. Noyelles, A. Vienne</i>	
Organisation et structure du service Web de l'IMCCE	77
<i>Ch. Bakabadio, P. Descamps, J. Berthier</i>	
Les objets du système solaire dans l'Observatoire Virtuel	81
<i>W. Thuillot, J. Berthier, V. Lainey, F. Vachier, J.-E. Arlot</i>	
AsterOA : les astéroïdes binaires en optique adaptative	
<i>F. Vachier, J. Berthier, P. Descamps, D. Hestrofer, F. Marchis (texte non communiqué)</i>	
La nouvelle Connaissance des Temps.....	87
<i>J.-L. Simon, A. Fienga, M. Birlan, J. Normand, W. Thuillot</i>	
La détermination de masses des astéroïdes avec la mission Gaia	91
<i>S. Mouret, D. Hestroffer, F. Mignard</i>	
INPOP -Modèle dynamique.....	
<i>H. Manche, A. Fienga, J. Laskar, M. Gastineau, J.L. Simon (texte non communiqué)</i>	
Propagation des erreurs dans les éphémérides d'astéroïdes et de satellites	95
<i>J. Desmars</i>	
Structures résonantes et stabilité des troyens de Jupiter II : évolution pendant la migration des planètes	
<i>J. Bodossian, Ph. Robutel (texte non communiqué)</i>	
Contraindre les paramètres orbitaux des planètes extrasolaires en combinant les mesures de vitesses radiales, avec une étude dynamique du système	
<i>J. Couetdic, J. Laskar, A.C.M. Correia (texte non communiqué)</i>	
Recherches effectives de solutions quasi-périodiques dans des systèmes hamiltoniens	101
<i>G. Morin</i>	
La bibliothèque de l'IMCCE	107
<i>Th. Derouazi</i>	
Équinoxe sur Uranus le 7 décembre 2007: prédiction de phénomènes et observations	111
<i>J.-E. Arlot</i>	
Les activités de l'IMCCE sur les essaims météoritiques	
<i>J. Vaubaillon, F. Colas (texte non communiqué)</i>	
Pourquoi trois points d'Euler?	
<i>A. Albouy (texte non communiqué)</i>	
Traceurs des collisions dans la ceinture principale	119
<i>M. Birlan</i>	
Near Earth Asteroids Observations at Pic du Midi	
<i>O. Vaduvescu, M. Birlan, F. Colas, J. Lecacheux (texte non communiqué)</i>	

Nouvelle réduction des plaques photographiques des satellites galiléens de Jupiter : premiers résultats	125
<i>V. Robert, J.E. Arlot, V. Lainey</i>	
Le service des renseignements astronomiques.....	127
<i>Ph. Duhamel, P. Rocher</i>	
Exemples de diffusion d'Arnold avec convergence vers un mouvement brownien	129
<i>D. Sauzin</i>	
Analyse spectrale et photométrie de l'astéroïde 21 Lutetia, cible de Rosetta	133
<i>A. Nedelcu</i>	
Évolution des moyens informatiques communs	139
<i>J. Lecubin</i>	
Les passages de Vénus	
<i>R. Lambert (texte non communiqué)</i>	
Detecting small binary asteroids	
<i>P. Pravec, P. Scheirich, P. Kusnirak (texte non communiqué)</i>	

Où était Amerigo Vespucci le 23 août 1499 ?

P. Rocher

Introduction

Le service des renseignements de l'IMCCE reçoit de nombreuses demandes. Parmi ces demandes, certaines émanent d'historiens ou d'archéologues : elles portent en général sur des problèmes de chronologie, d'alignements planétaires ou solaires. Certaines plus intéressantes nécessitent de développer de nouveaux programmes pour y répondre. À titre d'exemple je me propose de vous décrire une de ces demandes et les réponses que j'ai pu y apporter.

Les questions

La demande de renseignement provient de Jean-José Segeric pour la préparation d'un livre « Histoire du point astronomique en Mer » (2006). Cette personne me posait plusieurs questions dont en voici deux.

Lors du transfert de Napoléon Bonaparte sur l'île de St Hélène en 1815 à bord du HMS Northumberland, il est fait état de mesure des positions des navires de l'escadre anglaise par la méthode des distances à la Lune. Mon interlocuteur s'étonne que l'on donne des positions des navires chaque premier jour d'octobre 1815 alors que la nouvelle Lune tombait le 3 octobre. Il se demande si l'observation était possible et si le Nautical Almanach de l'époque fournissait ou non les distances à la Lune les jours de nouvelle Lune. Dans le Nautical Almanach, comme dans la Connaissance des Temps on ne donnait pas les distances à la Lune les jours de nouvelle Lune. Je l'ai vérifié sur le volume de 1816 disponible à la bibliothèque de l'IMCCE. Par contre, ayant les coordonnées estimées des navires, j'ai vérifié que les dernier et premier croissants de Lune avaient une élongation suffisante pour être visibles le matin précédent la nouvelle et le soir suivant la nouvelle Lune, l'interruption de visibilité étant de seulement 36h il fut donc possible de faire le point chaque jour si les distances à la Lune avaient été publiées. Ce délai très court, la visibilité tardive du dernier croissant et précoce du premier croissant proviennent de la latitude du lieu d'observation (6° de latitude sud) le Soleil et la Lune se levant quasiment à la verticale.

La seconde question portait sur un extrait d'une lettre d'Amerigo Vespucci donnant une méthode pour déterminer sa longitude en mer la nuit du 23 août 1499.

La lettre de Vespucci

Vespucci prétend avoir effectué quatre voyages dont voici la liste :

- Premier voyage : du 10 mai 1497 au 15 octobre 1498, de Cadix à Cadix, vraisemblablement avec Juan Diaz de Solis, quatre navires (roi don Ferdinand de Castille).
- Second voyage : du 16 mai 1499 au 8 septembre 1500, de Cadix à Cadix, avec Alonso de Hojeda et Juan de la Cosa.
- Troisième voyage : du 10 mai 1501 au 7 septembre 1502, recherche d'un passage vers le sud, commandité par dom Manuel Ier de Portugal.
- Quatrième voyage : du 10 mai 1503 au 18 juin 1504, avec Gonçalo Coelho.

Ces quatre voyages sont décrits dans des lettres (lettres familières) adressées à Lorenzo di Pier Francesco de Medici et dans deux textes : le *Mundus Novus*, un récit du troisième voyage adressé à Lorenzo di Pier Francesco et la *Lettera*¹, un récit des quatre voyages destiné à Pier Soderini gonfalonier perpétuel de la République de Florence dont le texte est achevé le 4 septembre 1504, et publié pour la première fois entre 1504 et 1506.

Le premier voyage de Vespucci est contesté par de nombreux historiens, par contre les second et troisième voyages sont généralement attestés véridiques.

La lettre, envoyée de Séville à Lorenzo di Pier Francesco de Medici à Florence, relate le second voyage de Vespucci du 16 mai 1499 au 8 septembre 1500, avec Alonso de Hojeda et Juan de la Cosa. On a une preuve de la

¹ Lettera est l'intitulé de : Lettera di Amerigo Vespucci delle isole nuovamente trovate in quattro suoi viaggi.

présence de Vespucci dans cette expédition suite à plusieurs témoignages de ses compagnons, dont Hojeda, lors d'un procès qui eut lieu en 1513-1515 contre les fils de Colomb (J. P. Duviols, 2005). On possède six manuscrits de cette lettre conservés à la bibliothèque Riccardiana de Florence, le plus ancien est signé Amerigo Vespucci (n° 2112). Ce manuscrit est considéré autographe par Roberto Levillier (1984, tome I, p. 255 – 262).

Dans cette lettre Vespucci parle de la difficulté de déterminer la longitude et donne un exemple utilisant une conjonction de la Lune avec la planète Mars.

« Après de nombreuses nuits que je restai en observation, une nuit parmi d'autres, le 23 août 1499, il y eut une conjonction de la Lune avec Mars, laquelle selon l'Almanach (de Giovanni de Montereccio) devait se produire à minuit ou une demi-heure plus tard.

Or je trouvai que lorsque la Lune s'était levée sur notre horizon, une heure et demi après le coucher du soleil, la planète était passée du côté de l'Orient. Je veux dire que la Lune se trouvait plus à l'orient de Mars de près d'un degré et à peu près une minute de plus.

A minuit, elle se trouvait plus à l'orient de 5° 30' (15° 30'), plus ou moins. De sorte que, proportionnellement, si 24 heures valent bien 360°, que vaudront 5 heures et demi? Je trouve qu'elles valent 82°30'. Je me trouvais à une telle distance en longitude du méridien de la ville de Cadix ».

Traduction française de Jean-Paul Duviols (2005, p. 80 – 81).

Comme on le constate, le texte de la traduction de la lettre de Vespucci comporte trois informations astronomiques :

- La Lune se lève sur l'horizon une heure et demie après le coucher du Soleil.
- A son lever la Lune est passée à l'est de Mars et son élongation est de un degré et une minute de degré.
- Lorsqu'il est minuit local, l'élongation entre la Lune et Mars est de 5°30' (le texte donne 15°30').

De ces trois observations seule la troisième est utilisée par Vespucci pour déduire sa longitude, son raisonnement n'est pas clair, il utilise le fait que l'Almanach de Regiomontanus donne la conjonction entre la Lune et Mars à minuit (minuit et demi) au méridien de Ferrare (Italie). La longitude du méridien de Ferrare est de 11° 38'E soit 46min 32s est.

De l'écart angulaire à minuit heure locale de son lieu d'observation, Vespucci déduit une longitude de 82,5° du méridien de Cadix à l'aide d'une simple règle de trois. Vespucci estime que la variation d'élongation de 5°30' entre la Lune et Mars depuis sa conjonction s'est faite en 5h 30min, ce qui suppose une vitesse angulaire de la Lune par rapport à Mars très importante (1° par heure), de plus il semble négliger la différence de longitude entre Cadix (6°18' ouest) et Ferrare (11° 38' est) soit 17° 56' (1h 11min 44s). Si l'on corrige son résultat de cette erreur de longitude, on trouve qu'il doit se trouver à 70°52' à l'est du méridien de Greenwich. Si l'on rapporte cette longitude sur la carte représentant le voyage Alonso de Hojeda, on trouve une position cohérente avec le trajet du voyage tel que l'a publié Roberto Levillier (1948).



Figure 1. Trajet du second voyage de Vespucci d'après la carte de Roberto Levillier (1948).

Le calcul exact montre que la conjonction géocentrique en longitude entre la Lune et Mars a lieu le 23 août 1499 à 19h 58m 21s UT, soit à 20h 44m 53s en temps moyen du méridien de Ferrare. La conjonction topocentrique ayant lieu à 19h 18m 14s UT, soit 20h 4m 46s en temps moyen de Ferrare, à cet instant la Lune n'est pas levée à Ferrare, elle se trouve 49' 22,84" sous l'horizon. On constate la grande imprécision de la prédiction de Regiomontanus, elle est due à la mauvaise connaissance du mouvement des deux corps, principalement celui de la Lune car on ne connaissait pas encore la troisième plus grosse inégalité dans le mouvement lunaire : la variation.

La méthode utilisée par Vespucci est très imprécise, indépendamment des erreurs de la prédiction elle ne prend pas en compte les effets de parallaxe qui se sont pas négligeables pour la Lune.

Peut-on calculer où était Vespucci à l'aide des informations fournies ?

Essayons de voir si l'on peut tirer quelques informations des trois « observations » de Vespucci.

Première observation

La première ne comporte pas de mesure angulaire, mais porte sur une mesure de durée, on ne sait pas à quoi se rapporte le lever et le coucher des deux astres (les bords supérieurs, les centres ou les bords inférieurs). Si on suppose que le lever et le coucher se rapportent à la même définition : coucher du bord supérieur du Soleil et lever du bord inférieur de la Lune, coucher du bord inférieur du Soleil et lever du bord supérieur de la Lune ou lever et coucher des centres des deux astres ; le choix de la définition n'a que peu d'incidence sur la durée entre les deux observations les intervalles de temps étant très voisins.

Si l'on prend le coucher du bord supérieur et le lever du bord supérieur de la Lune, la durée est diminuée du temps de coucher d'un rayon du Soleil et du temps de lever d'un rayon de la Lune (soit environ 2,2 minutes de temps pour une latitude de 12° N). Inversement si l'on prend le coucher du bord inférieur du Soleil et le lever du bord inférieur de la Lune la durée est augmentée du temps de coucher d'un rayon du Soleil et du temps de lever d'un rayon de la Lune (soit environ 2,2 minutes de temps pour une latitude de 12° N). Cet écart est négligeable devant la durée séparant le lever de la Lune et le coucher du Soleil (1h 30m).

J'ai tracé (en vert sur la carte) les lieux où le centre de la Lune se lève 1h 30min après le coucher du centre du Soleil. Tous les calculs tiennent compte de la réfraction atmosphérique et de la parallaxe. On constate que cette courbe est très haute en latitude par rapport à une observation supposée faite sur la côte nord de l'Amérique du sud (où est censé se trouver Vespucci). J'ai également tracé en pointillé vert les lieux où les écarts sont de 1h 45m, 2h et 2h 15m. On constate que l'intervalle correct pour une estimation de position de Vespucci se situe entre 2h et 2h 15min. Donc si l'observation de Vespucci est réelle, l'« horloge » de Vespucci fonctionne trop lentement, elle mesure 1h 30m alors qu'il s'est écoulé entre 2h et 2h 15m.

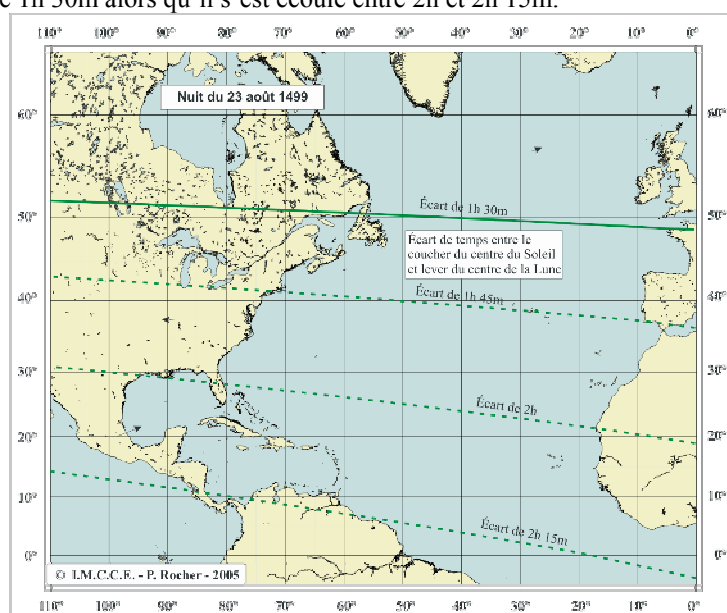


Figure. 2. Lever et coucher de la Lune à 1h 30m, 1h 45m, 2h et 2h 15m d'intervalle.

Seconde observation

La seconde observation semble, à première vue, la plus prometteuse car elle ne fait pas intervenir de mesure de temps, elle porte sur l'observation de l'écart angulaire entre la Lune et Mars au lever de la Lune. On doit faire plusieurs hypothèses pour cette observation : le lever de la Lune peut correspondre au lever du centre de la Lune ou au lever du bord inférieur de la Lune, de même la distance entre la Lune et Mars peut être la distance entre le centre de la Lune et le centre de Mars ou la distance entre le bord de la Lune et le centre de Mars (dans tous les cas on peut négliger le rayon apparent de Mars). J'ai donc tracé les quatre courbes suivantes :

- Ligne bleue pleine : lieux où l'élongation entre le centre de la Lune et le centre de Mars est égale à $1^{\circ} 1'$ lorsque le centre de la Lune est à l'horizon.
- Ligne violette pleine : lieux où l'élongation entre le bord de la Lune et le centre de Mars est égale à $1^{\circ} 1'$ lorsque le centre de la Lune est à l'horizon.
- Ligne bleue en pointillé : lieux où l'élongation entre le centre de la Lune et le centre de Mars est égale à $1^{\circ} 1'$ lorsque le centre de la Lune est $15'$ au-dessus de l'horizon (donc le bord inférieur proche de l'horizon).
- Ligne violette en pointillé : lieux où l'élongation entre le bord de la Lune et le centre de Mars est égale à $1^{\circ} 1'$ lorsque le centre de la Lune est $15'$ au-dessus de l'horizon.

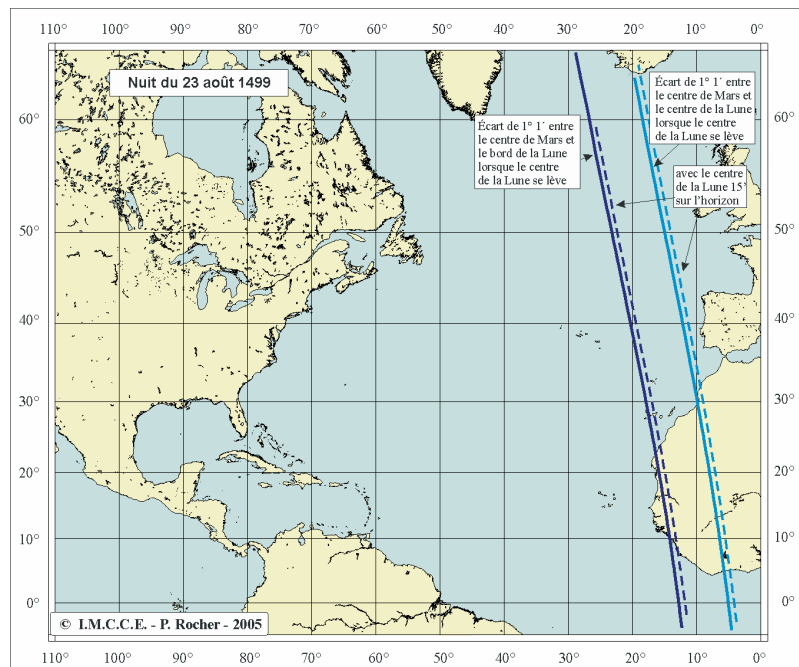


Figure 3. Lune à l'horizon et élongation de $1^{\circ} 1'$ avec Mars.

On remarque que tous ces tracés sont trop à l'est, si l'observation est réelle, l'erreur ne peut pas porter sur le lever de la Lune (il n'y a pas de mesure), mais porte sur l'évaluation de la distance angulaire entre les astres qui, vue de la côte américaine, avec une Lune à l'horizon, est proche de 3° . Cette erreur est énorme, elle est de l'ordre de quatre diamètres lunaires ce qui n'est pas réaliste. La seule explication plausible est une erreur de transcription du texte 1° à la place de 3° , ce qui semble également difficile, la valeur de l'élongation étant indiquée sous forme littérale et non sous forme numérique. Il conviendra de vérifier sur le manuscrit original.

Troisième observation

La troisième observation concerne l'élongation entre la Lune et Mars à minuit heure locale. De nouveau on a deux hypothèses possibles : soit l'élongation est l'écart entre le bord de la Lune et Mars, soit l'élongation est l'écart entre les centres des deux astres. J'ai donc tracé les courbes relatives à ces deux hypothèses :

- Ligne orange pleine : lieux où l'élongation entre le centre de la Lune et le centre de Mars est égale à $5^{\circ} 30'$ lorsqu'il est minuit heure locale.
- Ligne rouge pleine : lieux où l'élongation entre le bord de la Lune et le centre de Mars est égale à $5^{\circ} 30'$ lorsqu'il est minuit heure locale.

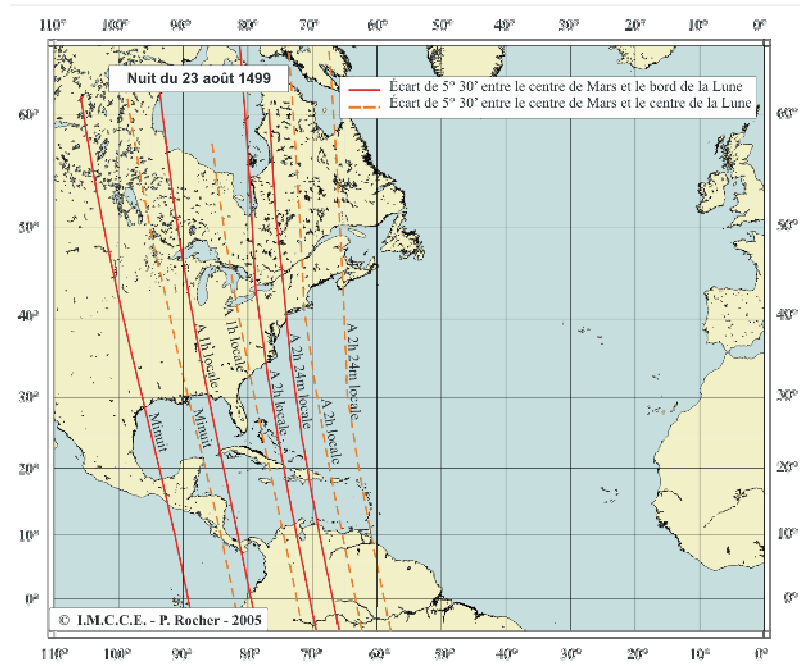


Figure 4. Élongation de 5°30' à minuit, 1h 2h et 2h 24m heure locale.

On constate que ces lignes passent un peu à l'ouest par rapport au trajet supposé du second voyage de Vespucci. Pour décaler ces courbes vers l'est, on doit les tracer pour 1h, 2h locales. Sur la carte, j'ai tracé en pointillé orange et en rouge les courbes correspondant à une observation à 1h, 2h et 2h 24m de temps moyen local. De nouveau si l'observation est réelle, alors le décalage vers l'est, si l'élongation mesurée est bonne, se traduit par une mauvaise mesure du temps, Vespucci mesure minuit alors qu'il est entre 2h et 2h 15m heure locale. On remarque que le défaut de l'« horloge » dans ce cas est le même que dans le cas de la première observation.

Conclusion des calculs

On est un peu déçu, on aurait bien aimé avoir un résultat plus net. Les observations une et trois sont cohérentes si l'on suppose une horloge qui avance rapidement ou une erreur de temps ; chose toute à fait possible pour l'époque. En effet on utilisait des ampoulettes d'une demi-heure pour compter les quarts sur les navires et pour naviguer à l'estime, et les erreurs étaient fréquentes. Par contre l'observation deux est totalement impossible depuis la côte américaine.

Personnellement, je pense que l'observation décrite par Vespucci est plus un exemple de calcul permettant de calculer la longitude, qu'une observation réelle. Il y a trop d'incompatibilités entre les observations et la réalité. De plus on remarque que les données des trois observations sont très cohérentes entre elles et ressemblent plus au résultat d'un calcul qu'à de véritables observations. En effet si on estime, comme le fait Vespucci que l'écart angulaire entre la Lune et Mars varie de la vitesse de un degré par heure, et si comme Vespucci l'indique à plusieurs reprises il estime que la durée de la nuit est égale à la durée du jour, le Soleil se couche 6h avant minuit, l'élongation Lune – Mars est alors de 30' ouest, et une heure et demi plus tard à l'instant où il indique que la Lune se lève l'élongation est de l'ordre de 1° est. C'est trop beau pour être vrai, la variation d'élongation est en réalité deux fois plus faible ! De plus si ce dernier calcul est exact le raisonnement ne l'est pas car il exclut la parallaxe lunaire qui est de l'ordre de deux diamètres lunaires à l'horizon lorsque la Lune se lève. Peut-être a-t-il observé uniquement l'élongation à « minuit » et en a-t-il déduit les deux premières « observations » par le calcul pour rendre son discours plus plausible ?

Conclusion

Vous avez ici l'exemple d'un calcul qui a permis de clarifier un texte, l'observation ne semble pas réelle au vu des calculs. Cela n'enlève pas à Vespucci l'excellente idée d'utiliser les conjonctions entre la Lune et les

planètes pour essayer de déterminer les longitudes en mer, idée qu'il a vraisemblablement empruntée à Regiomontanus, tout au moins a-t-il peut-être essayé de la mettre en pratique. Pratique qui, à l'époque, était vouée à l'échec en raison de l'imprécision des éphémérides lunaires.

Références

América la bien llamada, deux tomes, Roberto Levillier, 1948, Buenos Aires.

Le nouveau monde, Les voyages d'Amerigo Vespucci (1497 – 1505), Traduction, introduction et notes de Jean-Pauls Duviols, 2005, édition Chandeigne, Paris.

Histoire du point astronomique en mer, Jean-José Segeric, 2006, Marine édition.

Les polygones déchainés et le problème des n corps

Alain Chenciner & Jacques Féjóz

La solution la plus simple du problème des n corps – l'équilibre relatif de n masses égales disposées aux sommets d'un polygone régulier – se révèle d'une étonnante richesse si l'on étudie globalement et en repère tournant les familles de solutions quasi-périodiques qui en bifurquent dans la direction normale au plan du polygone. Techniquement, l'étude de ce prolongement global se fait en minimisant l'action sous une contrainte de symétrie. Prolongeant le travail pionnier de Christian Marchal nous montrons en particulier que le "Huit" et le "Hip-Hop" (voir la figure 1) – deux éléments paradigmatiques des familles de solutions périodiques étudiées récemment par la méthode variationnelle (les chorégraphies et les Hip-Hops généralisés) – ont une origine commune : de même que le Huit s'obtient par « déchainement » de l'équilibre relatif du triangle équilatéral, le Hip-Hop s'obtient par « déchainement » de celui du carré. Voici les phases principales de l'étude.

L'équation aux variations verticales d'un équilibre relatif (supposé se mouvoir dans un plan horizontal) est particulièrement simple. Le théorème de Pythagore impliquant la constance au deuxième ordre près des distances mutuelles r_{ij} sous l'effet de petites variations orthogonales z_i , celle-ci s'écrit en effet

$$\ddot{z}_i = \sum_{j \neq i} m_j \frac{z_j - z_i}{r_{ij}^3}. \quad (\text{VVE})$$

Lorsque les masses sont égales, les solutions infiniment proches de l'équilibre relatif d'un polygone régulier associées aux solutions de (VVE) acquièrent de nombreuses symétries (et deviennent en particulier périodiques) dès qu'on les observe dans un repère tournant à une fréquence qui met en résonance une fréquence normale et celle de l'équilibre relatif (figure 2).

La minimisation de l'action lagrangienne, à période fixée T dans le repère tournant, sous la contraintes des symétries ainsi mises au jour, permet de montrer l'existence de familles de solutions quasi-périodiques (précisément, périodiques dans un repère tournant) dont l'origine est l'équilibre relatif d'un polygone régulier et dont l'aboutissement est une solution de type chorégraphie ou Hip-Hop. Les contraintes de symétries étant en particulier satisfaites par (un multiple de) la solution d'équilibre relatif dans le repère tournant choisi, les familles étudiées correspondent à une bifurcation de l'action, c'est-à-dire à une valeur de la rotation du repère pour laquelle (un multiple de) la solution de Lagrange ayant la période fixée dans le repère tournant cesse d'être un minimum (figure 3).

D'autres possibilités pour 4 et 5 corps sont tracées la figure 4, tirée de [CF1]. À suivre.

Références

[C] A. Chenciner, Polygones déchainés et le problème des n corps, à paraître dans le *Journal du CNRS* (2006). Version anglaise à paraître (Académie de Bruxelles)

[CF1] A. Chenciner & J. Féjóz, L'équation aux variations verticales d'un équilibre relatif comme source de nouvelles solutions périodiques du problème des N corps *CRAS*, **340**, n°8, 593–598 (15 avril 2005) et article en préparation

[CF2] A. Chenciner & J. Féjóz, The flow of the equal-mass spatial 3-body problem in the neighborhood of the equilateral relative equilibrium, preprint (mai 2006)

[M] C. Marchal, The family P_{12} of the three-body problem. The simplest family of periodic orbits with twelve symmetries per period *Cel. Mech. Dynam. Astron.* **78**, 279–298 (2000)

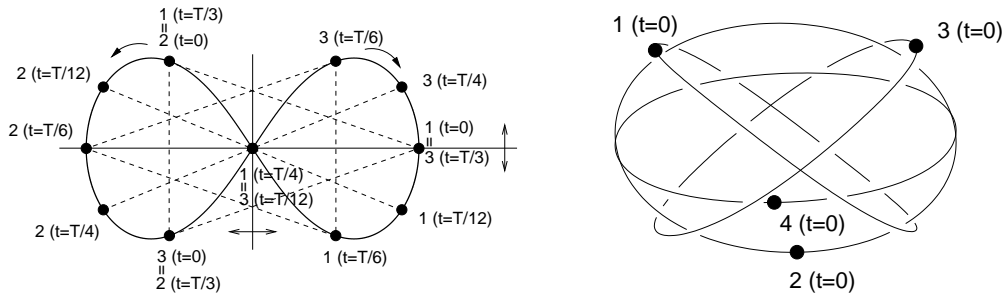


FIG. 1 – *Le Huit et le Hip-Hop*

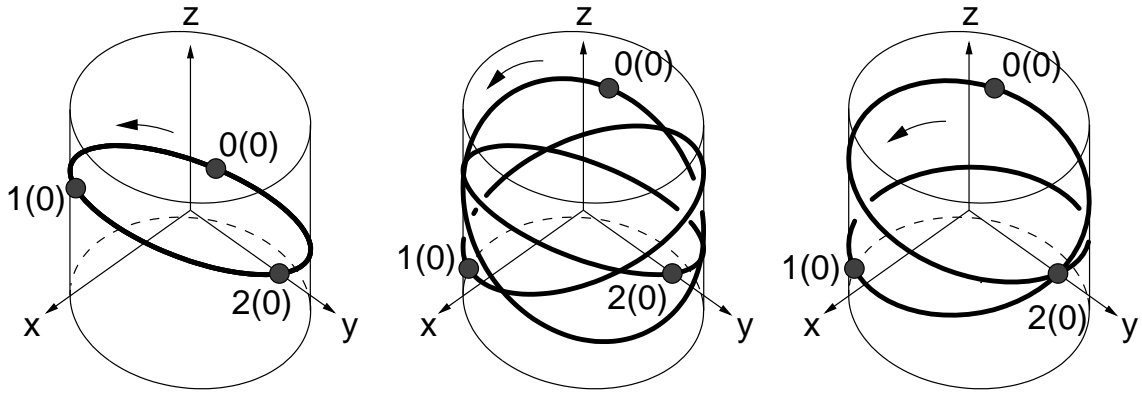


FIG. 2 – *De gauche à droite : une variation verticale triviale et la variation verticale de P_{12} en repère fixe, puis cette dernière en repère tournant.*

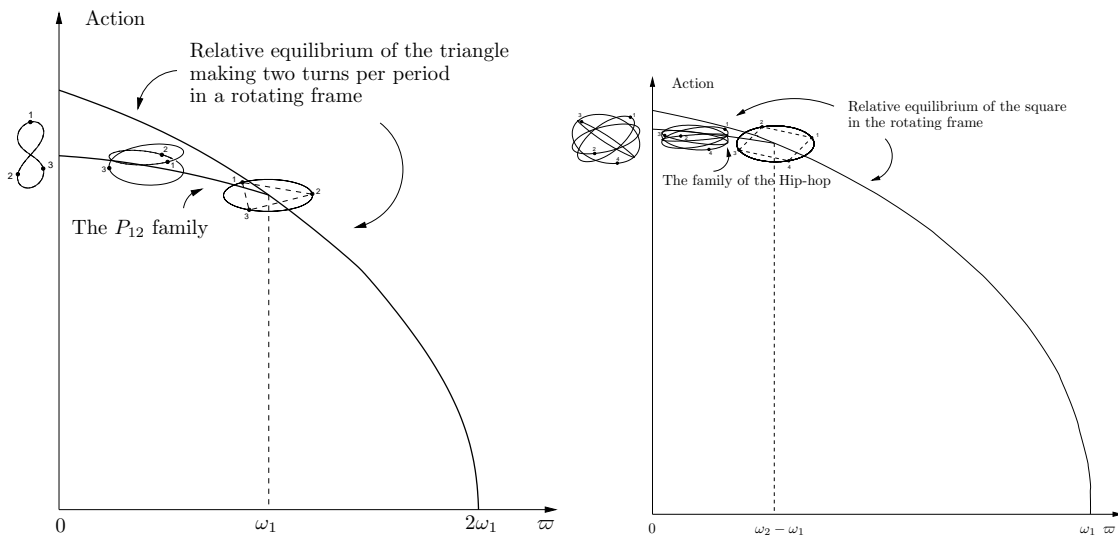


FIG. 3 – *Les familles du Huit et du Hip-Hop : en abscisse la rotation du repère, en ordonnée l'action sur une période*

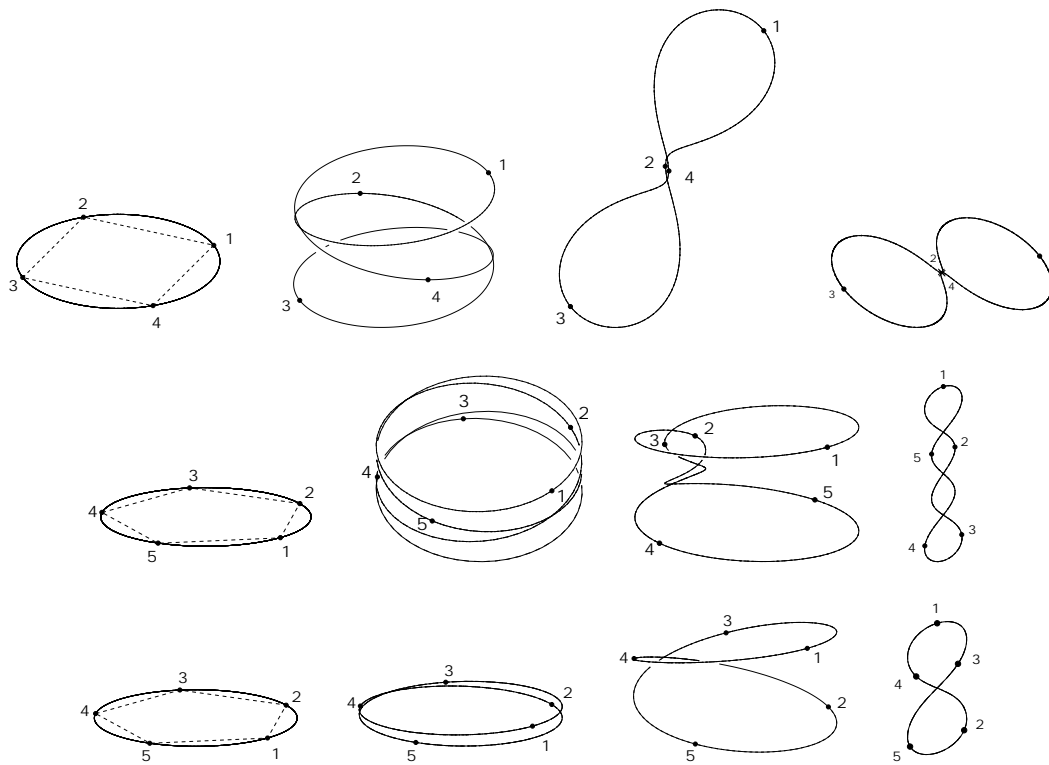


FIG. 4 – Polygones déchainés : chaîne à 3 lobes et 4 corps, et chaîne à 4 lobes et Huit à 5 corps

Les missions : des déplacements réglementés

Isabelle Nicolas

Les missions, depuis la demande d'ordre de mission jusqu'au remboursement des frais, obéissent à une réglementation précise, dictée par des textes réglementaires (décrets et circulaires). Ces textes servent de base à tous les organismes concernés (CNRS, Observatoire,...). Ils indiquent, entre autres, quelles dépenses peuvent être prises en charge au titre de la mission et, s'il y a lieu, pour quels montants maximums.

Partir en mission

L'agent en mission doit toujours être en possession d'un ordre de mission de son organisme payeur (l'organisme qui lui verse son salaire). Ce document lui permet d'être en règle avec son administration et couvert en cas d'accident (au titre des accidents de service).

La demande d'ordre de mission signée par le responsable d'unité atteste qu'il accepte le déplacement (objet, mode de transport, éventuellement niveau de remboursement) et autorise la mission. Les étudiants doivent également obtenir l'accord de leur chef d'équipe puisque leurs frais de mission sont payés sur les crédits d'équipe.

L'ordre de mission est également le document de base qui va permettre, à l'issue de la mission, d'obtenir le remboursement des dépenses engagées. Ce n'est pas forcément l'organisme payeur de l'agent qui prend en charge ces frais. Il y a donc un deuxième ordre de mission (voir un troisième).

Enfin, sous certaines conditions (cumuler plus de trois mois de missions hors Europe sur une période de douze mois consécutifs, et produire les ordres de mission correspondants à la fin de sa carrière) ces documents permettent d'obtenir une bonification pour la retraite.

Ne pas avancer les frais

De nombreuses mesures sont prises pour éviter à l'agent d'avancer les frais de sa mission :

- L'achat direct des billets par l'administration est rendu possible via les services de KTS (pour l'Observatoire) et Havas (pour le CNRS). Ces agences permettent de réserver des billets de train ou d'avion, mais aussi de louer un véhicule de location ou de faire établir un visa.
- Le paiement des inscriptions aux colloques, souvent onéreux, peut se faire sous deux formes : s'il s'agit d'une manifestation en France, un bon de commande est en général accepté, qui donnera lieu à l'établissement d'une facture. Si la manifestation a lieu à l'étranger, ce mode de paiement n'étant plus possible, le CNRS accepte de payer, sans facture, par virement ou carte bancaire, sur présentation d'une confirmation d'inscription de l'agent et d'un ordre de mission. Cette option n'est possible que si la demande est faite au minimum un mois avant la date limite de paiement.
- Enfin une demande d'avance, représentant 70 à 75% des frais de séjour estimés, à condition qu'ils atteignent 228,67 euros (1500 francs), permet à l'agent de recevoir une partie de la somme nécessaire à sa mission environ une semaine avant son départ. Là encore la demande doit être faite un mois à l'avance.

La notion de groupe

Les agents sont répartis en trois groupes (les groupes IV et V n'existant plus). Du groupe considéré dépend le niveau de remboursement des missions à l'étranger. Il est à noter cependant que pour certains pays (par exemple l'Espagne), les remboursements sont les mêmes pour les trois groupes. Pour la France également, tous les agents bénéficient des mêmes montants. Pour les personnes étrangères à l'administration enfin, le classement se fait par assimilation.

- Le groupe I comprend les agents de catégorie A (IE, IR et AI) ou qui perçoivent une rémunération de début supérieure ou égale à l'indice brut 470 ou un salaire de base supérieur à celui de l'indice brut 605.

- Le groupe II comprend les agents de catégorie B (T) ou qui perçoivent une rémunération de début supérieure ou égale à l'indice brut 300 ou un salaire de base supérieur à celui de l'indice brut 445.
- Le groupe III comprend tous les autres agents (doctorants, stagiaires, retraités,...).

Le remboursement des missions en France

Pour le calcul des indemnités, on considère que la mission commence quand l'agent quitte sa résidence et se termine quand il y revient. Les horaires pris en compte sont ceux des billets avec un bonus d'une demi-heure à l'aller et au retour pour un trajet en train, se montant à une heure à l'aller et au retour pour un trajet en avion, ceci pour prendre en compte les temps de transport nécessaires pour les trajets de la résidence administrative ou familiale de l'agent à la gare ou à l'aéroport.

L'indemnité de nuitée comprend la nuit et le petit déjeuner et peut prendre deux valeurs : 53,36 euros pour Paris et ses communes limitrophes (Aubervilliers, Pantin, Le-Pré-Saint-Gervais, Les Lilas, Bagnolet, Montreuil, Fontenay-sous-Bois, Saint-Mandé, Vincennes, Nogent-sur-Marne, Joinville-Le-Pont, Saint-Maurice, Charenton-Le-Pont, Ivry-sur-Seine, le Kremlin-Bicêtre, Gentilly, Montrouge, Malakoff, Vanves, Issy-les-Moulineaux, Boulogne-Billancourt, Saint-Cloud, Suresnes, Puteaux, Neuilly-sur-Seine, Levallois-Perret, Clichy, Saint-Ouen, Saint-Denis) et 38,11 euros pour la province. Elle est versée à l'agent en mission sur toute la plage horaire comprise entre minuit et 5h00 du matin, sur production d'une facture d'hébergement. Il est à noter que le montant de cette facture, qu'il soit supérieur ou même inférieur au montant réglementaire, n'aura aucune incidence sur le remboursement.

Les indemnités de repas, au nombre de deux, sont toujours de 15,25 euros chacune et sont versées si l'agent est en mission entre 11h00 et 14h00 pour le déjeuner, et entre 18h00 et 21h00 pour le dîner. Là encore il faut être en mission sur la plage horaire complète. Ces indemnités sont divisées par deux si l'agent s'est rendu dans un restaurant administratif.

Des abattements sont appliqués si le séjour se prolonge dans une même localité, à savoir : l'indemnité journalière est réduite de 10 % à partir du 11^{ème} jour et de 20% à partir du 31^{ème}.

Le remboursement des missions à l'étranger

Pour le calcul des indemnités, on considère que la mission commence à l'heure d'arrivée dans l'aéroport (port, gare) du pays visité et se termine à l'heure de départ de l'aéroport (port, gare) du pays visité. Cela signifie qu'aucune dépense ne sera prise en charge pendant la durée du trajet (à l'exception des frais du voyage lui-même, depuis le départ de la résidence administrative ou familiale jusqu'au lieu de mission ou l'hôtel). La règle souffre cependant une exception, en cas d'escale dépassant 7 heures.

Pour l'étranger, la réglementation a établi les indemnités journalières. L'indemnité journalière correspond au montant payé par nuit (ou fraction de nuit) passée à destination. Son taux varie en fonction du pays visité et du groupe de classement de l'agent. Pour une mission se déroulant sur une seule journée, le missionnaire a droit à 50% de l'indemnité journalière. Pour une mission se déroulant sur plusieurs jours, il a droit à 50% au titre du dernier jour si la mission se prolonge au delà de 17h00. Si l'on doit décomposer l'indemnité (par exemple pour retenir la part correspondante à un repas gratuit) on considère que la nuitée (petit-déjeuner compris) compte pour 50 % et que chaque repas compte pour 25 %. Mais en vérité l'indemnité comprend aussi tous les autres frais à l'intérieur de la mission (déplacement,...). Là encore des abattements sont prévus pour un séjour prolongé : l'indemnité est réduite de 20 % à partir de la 31^{ème} journée et de 40 % à partir de la 61^{ème} journée.

Au retour de mission, l'agent doit obligatoirement fournir ses titres de transport. A défaut une attestation de perte sera produite. D'autres justificatifs peuvent également être demandés (programme pour un colloque, reçus divers,...).

Il est à noter que dans le cadre de la communauté européenne, Bruxelles a des indemnités particulières pour les missions inférieures ou égales à une journée.

Les dépenses habituelles

Il s'agit des frais d'hôtel et de restauration, de transport quel qu'il soit (train, avion, véhicule de location, plus rarement pirogue,...), de carburant pour un véhicule de service ou de location, de péage, de stationnement près des gares ou des aéroports pour les missions de moins de 72 heures (ceci pour encourager l'usage des transports en commun), d'inscription à un colloque, mais aussi de visa, passeport, vaccins obligatoires pour peu qu'ils soient spécifiques à la mission concernée.

Les dépenses tolérées

La réglementation précise que l'agent en mission doit utiliser le mode de transport le plus direct et le plus économique. De ce fait les voyages en train au tarif 1^{ère} classe doivent être exceptionnels. De la même manière, l'usage du taxi doit se justifier par une absence de moyens de transport en commun (pour cause d'heure tardive, de grève, de mission dans un lieu isolé non desservi), par le transport de matériel précieux, fragile ou encombrant, ou enfin par l'économie due au transport d'autres missionnaires.

Enfin l'usage de la voiture personnelle est à éviter, surtout pour des missions à l'étranger, principalement pour des raisons de sécurité. Si le missionnaire ne veut ou ne peut utiliser un autre mode de transport, il devra, après acceptation de son responsable d'unité, signer une décharge attestant avoir une assurance en règle qui couvrirait, sans limitation, les dommages éventuels causés, aussi bien aux autres qu'à lui-même.

Les liens utiles

Le site minefi

L'adresse suivante permet de connaître la valeur de l'indemnité pour un pays donné.

http://www.minefi.gouv.fr/a_votre_service/informations_pratiques/chancellerie/mission.php

Cette valeur étant donné en monnaie locale (ou parfois en USD), l'adresse suivante fournit le taux de chancellerie en vigueur aux dates de la mission :

http://www.minefi.gouv.fr/a_votre_service/informations_pratiques/chancellerie/recherche.php

Le site du Ministère des affaires étrangères

A consulter impérativement avant chaque départ il donne au missionnaire une vision précise et actualisée du pays visité, des dangers éventuels, des endroits à éviter, des précautions à prendre...

http://www.diplomatie.gouv.fr/fr/conseils-aux-voyageurs_909/index.html

Le site de l'Agence Comptable Principale du CNRS

Ce site regroupe les liens vers tous les décrets, instructions et circulaires réglementant les missions, et permet d'en savoir plus.

<http://www.sg.cnrs.fr/acp/biblio/textes/fraismissions/default.htm>

Les textes réglementaires

Pour les missions en France :

- décret n° 90-437 du 28 mai 1990 modifié
- circulaire du 22 septembre 2000

Pour les missions à l'étranger :

- décret n° 86-416 du 12 mars 1986
- Instruction n°91-35-B1-03 du 15 mars 1991
- Instruction n° 92-12-M9 du 23 janvier 1992
- NS n° 06-006-03

Pour les missions dans les DOM, Mayotte et Saint-Pierre-et-Miquelon :

- décret n° 89-271 du 12 avril 1989 modifié
- NS n° 06-006-03

Pour les missions dans les TOM :

- décret n° 98-844 du 22 septembre 1998 modifié
- NS n° 06-006-03

Nouvelles versions des éphémérides des satellites naturels

Emelianov N.

Institut d'astronomie Sternberg, Moscou (SAI)
Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides, Observatoire de Paris

L'objectif de ce travail est le développement et la maintenance du serveur des éphémérides des satellites naturels. Une grande partie de ce travail est la création des nouvelles versions des éphémérides. Quand ces nouvelles versions des éphémérides sont-elles nécessaires ? Elles sont nécessaires quand :

- des nouvelles observations sont accumulées,
- une nouvelle théorie du mouvement est apparue,
- un nouveau satellite est découvert.

L'objectif général est de toujours avoir les éphémérides de tous les satellites fondées sur toutes les observations. Le serveur des éphémérides des satellites naturels est réalisé et accessible via Internet sur deux sites :

<http://www.imcce.fr/sat>

<http://lnfm1.sai.msu.ru/neb/nss/index.html>

Le travail pour une nouvelle version dépend du type de modèle de mouvement d'un satellite utilisé (voir la Table 1).

Table 1. Les soucis qui surgissent en création d'une nouvelle version.

Types du modèle de mouvement	Souci de la nouvelle version
Ellipse précessante	Changer les valeurs des paramètres
Théorie analytique	Programmer et réajuster les constantes
L'intégration numérique	Réajuster les conditions initiales

Le 4 juin 2006 les 153 satellites naturels (sauf la Lune) étaient connus. Ils sont répartis dans les groupes suivants (voir la Table 2).

Nos réactions à l'apparition d'une nouvelle portion des observations peuvent être différentes. On peut réajuster tout de suite les conditions initiales des satellites lointains ou bien attendre l'accumulation d'une quantité importante d'observations. Cela dépend de la période sur laquelle les observations étaient accumulées précédemment.

Un exemple. Pour le satellite S/2004 S15, les conditions initiales étaient ajustées pour 18 observations sur la période de 390 jours (à partir le 12 décembre 2005). Des éphémérides étaient calculées pour l'an 2008. Puis encore 4 observations étaient ajoutées sur l'intervalle de 61 jours. Après le réajustement des conditions initiales sur toute la période de 451 jours, les éphémérides pour l'an 2008 sont apparues changées à 3 secondes d'arc en ascension droite et déclinaison.

Conclusion : pour des nouveaux satellites lointains une nouvelle version se fait une fois tous les trois mois au fur et à mesure d'apparition des nouvelles observations.

Table 2. Les modèles disponibles pour des groupes des satellites.

Groupe des satellites	Nombre des satellites	Modeles du mouvement
Satellites de Mars	2	2 théories analytiques
Proches de Jupiter	4	les ellipses précessantes
Galiléens de Jupiter	4	3 théories analytiques
Lointains de Jupiter	54	l'intégration numérique
Proches de Saturne	12	les ellipses précessantes et 2 théories analytiques
Principaux de Saturne	8	2 théories analytiques
Lointains de Saturne	26	l'intégration numérique
Proches d'Uranus	13	les ellipses précessantes
Principaux d'Uranus	5	une seule théorie analytique
Lointains d'Uranus	9	l'intégration numérique
Proches de Neptune	6	les ellipses précessantes
Principaux de Neptune	2	les ellipses précessantes
Lointains de Neptune	5	l'intégration numérique
Satellites de Pluton	3	les ellipses précessantes

Deuxième exemple. Le modèle du mouvement du satellite de Jupiter Himalia était d'abord ajusté sur les 852 observations faites sur l'intervalle du 3 janvier 1905 au 10 février 2002 (93 ans). Après l'apparition de 346 nouvelles observations faites dans l'intervalle de 4 ans (au 11 avril 2006) les conditions initiales étaient réajustées. Les différences entre ces deux variantes d'éphémérides pour toutes les dates de 1905 à 2030 ne dépassent pas 0.07 secondes d'arc en ascension droite et en déclinaison.

Conclusion : pour les satellites J6-J13 et S9 (Phoebe) la création d'une nouvelle version est nécessaire tous les 3 ans.

En plus, des réajustements réguliers des modèles numériques sur des observations des autres modèles du mouvement des satellites naturels ont été créés. Les 32 nouveaux modèles d'ellipse précessante pour les satellites naturels sont apparus et les 6 nouvelles théories analytiques du mouvement de satellites naturels sont implantées au serveur :

- pour les satellites Galiléens G-5 par J.-E. Arlot, 1982;
- pour les satellites Galiléens par V. Lainey, 2004;
- pour les satellites de Mars par M. Chapront-Touze, 1990;
- pour les satellites de Mars par S. Kudryavtsev et al., 1997;
- pour les satellites de Mars par V. Lainey, 2006;
- pour les satellites co-orbitaux de Saturne par P. Oberti et A. Vienne, 2003.

Une fois les trois théories analytiques du mouvement des satellites de Mars réalisées, il est intéressant de comparer les éphémérides obtenues par ces théories. Les résultats de la comparaison des trois théories du mouvement de Phobos sur l'intervalle du 1.11.2007 à 1.02.2008 (90 jours autour de l'opposition de Mars) sont présentés sur les figures 1-3.

En comparant les théories (Kudryavtsev, 1997) et (Lainey, 2006), nous avons obtenu l'écart-type en ascension droite $0.019''$ (8.5 km) et en déclinaison $0.018''$ (8.3 km). Pour apprécier ces valeurs, on peut remarquer que le diamètre de Phobos est égal à 22 km.

De 1986 jusqu'à récemment, il existait une seule théorie du mouvement des satellites principaux d'Uranus (J. Laskar, R. Jacobson, 1986). C'est une théorie analytique ajustée sur les meilleures observations sur la période 1911-1986. Sur cette période l'écart-type de "O-C" est égal à $0.06''$. Tout de même, la même précision n'est pas garantie pour la période 2007-2009. Une meilleure prédiction des phénomènes mutuels en 2007-2009 est nécessaire. Par ailleurs, une grande quantité de bonnes observations a été effectuée sur la période 1987-2006.

Au premier pas, il faudrait ajuster les constantes d'intégration de la théorie (Laskar, Jacobson, 1986) sur toutes les observations. La théorie GUST86 présente bien toutes les observations de 1911-1986. C'est

pourquoi nous avons créé des observations artificielles sur cette période avec cette théorie. On a ajouté les autres observations réelles réalisées ces dernières années. La somme des observations utilisées est présentée dans la Table 3.

Table 3. Nombres des observations utilisées.

Source	Periode	U1	U2	U3	U4	U5	Par rapport à ...
Simulations(GUST86)	1905-1983	480	480	480	480	480	planète
Veiga(1987)	1982-1985	264	264	264	R	212	U4
Veiga(1994)	1983-1988	333	333	333	R	288	U4
Chanturiya(2002)	1987-1994	-	-	106	103	-	planète
Veiga(1995)	1989-1994	368	368	368	R	368	U4
Jones(1998)	1990-1991	139	131	127	R	115	U4
Veiga(1999)	1995-1998	745	735	368	R	750	U4
Stone(2001)	1998-2000	-	-	156	175	-	absolutes
USNO(2005)	1999-2005	-	-	183	213	-	absolutes

Sur cet ensemble d'observations, les constantes d'intégration de la théorie (Laskar, Jacobson, 1996) ont été ajustées. On peut voir dans la Table 4 la comparaison de la théorie avec les observations avant et après l'ajustement.

En résultat, une nouvelle version de la théorie (Laskar, Jacobson, 1996) dite "GUST06" a été créée. Des nouvelles éphémérides des satellites principaux d'Uranus sont mises à notre service. Les éphémérides des phénomènes mutuels en 2007-2009 ont été recalculées.

Pour tester la théorie (Laskar, Jacobson, 1996) les paramètres de cette théorie ont été ajustés sur les résultats d'intégration numérique pour les satellites d'Uranus fait par V.Lainey. Les écart obtenus sont de l'ordre de 0.01".

Conclusions. La précision interne de la théorie GUST86 est de l'ordre de 0.01" ce qui est inférieur à la précision des observations disponibles. La théorie GUST86 est en bon accord avec les observations récentes. L'ajustement des constantes d'intégration GUST86 sur une plus grande période d'observations ne change pas beaucoup les éphémérides au niveau de la précision des observations. Les nouvelles éphémérides des phénomènes mutuels ne sont pas beaucoup changées par rapport aux calculs précédents. Pour des futures éphémérides, une nouvelle théorie du mouvement des satellites d'Uranus est nécessaire.

Table 4. Comparaison de la théorie (Laskar, Jacobson, 1996) avec les observations. Les "O-C" sont donnés en secondes d'arc.

Source	Periode	Avant ajustement		Après ajustement	
		R.a.	Decl.	R.a.	Decl.
		O-C	O-C	O-C	O-C
Simulations(GUST86)	1905-1983	0.000	0.000	0.012	0.011
Veiga(1987)	1982-1985	0.116	0.118	0.116	0.118
Veiga(1994)	1983-1988	0.090	0.069	0.089	0.069
Chanturiya(2002)	1987-1994	0.420	0.480	0.420	0.470
Veiga(1995)	1989-1994	0.057	0.050	0.056	0.049
Jones(1998)	1990-1991	0.046	0.046	0.046	0.046
Veiga(1999)	1995-1998	0.050	0.057	0.048	0.054
Stone(2001)	1998-2000	0.154	0.143	0.153	0.141
USNO(2005)	1999-2005	0.161	0.143	0.159	0.142
	Pour l'ensemble	0.094	0.131	0.092	0.130

Tout de même, on peut prévoir certains progrès dans la précision des éphémérides des satellites principaux d'Uranus après un développement de la théorie (termes de deuxième ordre, autres perturbations). Une tentative d'effectuer le développement de la théorie complètement analytique est en cours au SAI.

Références

- Arlot J.-E. New constants for Sampson-Lieske theory of the Galilean Satellites of Jupiter. *Astronomy and Astrophysics*. 1982. V. **107**. N. 2. P. 305-310.
- Chapront-Touzé M. Orbits of the Martian satellites from Esapho and Esadei theories. *Astronomy and Astrophysics*. 1990. V. 240. P.159-172.
- Kudryavtsev S.M., Kolyuka Y.F., Tikhonov V.F. New Analytical Theory of Motion of Phobos and Deimos for Navigation Support of Mission to Mars. *ESA SP-403 : Proceedings of the 12th International Symposium on Space Flight Dynamics*. 1997. P. 377-382.
- Lainey V., Vienne A., Duriez L. New accurate ephemerides for the Galilean satellites of Jupiter. I. Numerical integration of elaborated equations of motion. *Astronomy and Astrophysics*. 2004. V. **420**. P. 1171-1183.
- Lainey V. New accurate ephemerides for the satellites of Mars. *Astronomy and Astrophysics*. 2006 à paraître.
- Laskar J., Jacobson R.A. GUST86 - An analytical ephemeris of the Uranian satellites. *Astronomy and Astrophysics*. 1987. V. **188**. P. 212-224.
- Oberti P., Vienne A. An upgraded theory for Helene, Telesto, and Calypso. *Astronomy and Astrophysics*. 2003. V. **397**. P. 353-359.

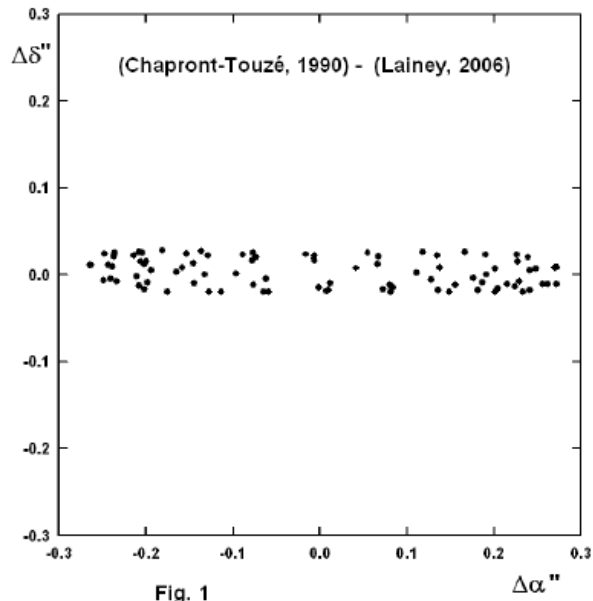


Fig. 1

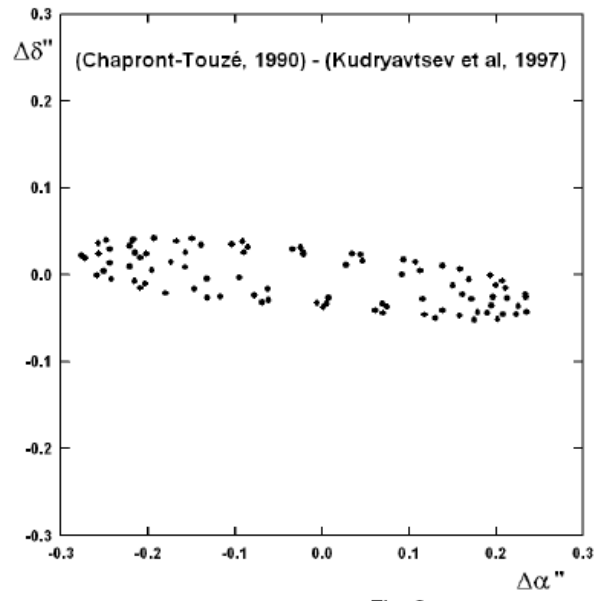


Fig. 2

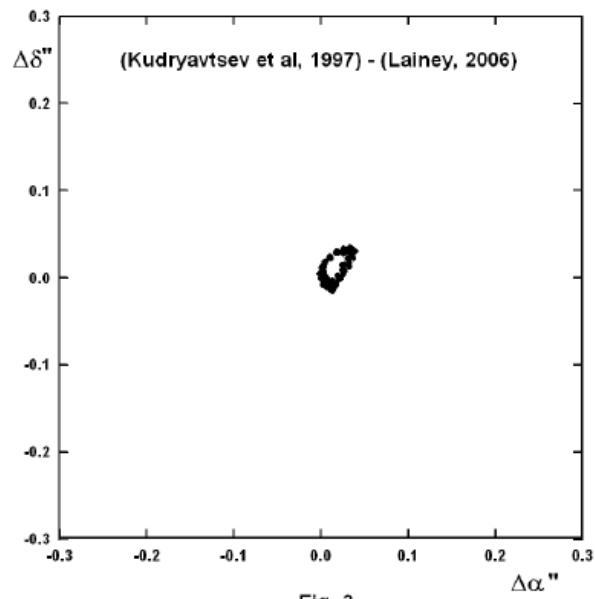


Fig. 3

Étude du système martien par la dynamique des satellites Phobos et Deimos

Valéry Lainey

Introduction

En un peu plus de deux années de mission, la sonde spatiale Européenne Mars Express a déjà réalisé de nombreuses images de la surface martienne et de ses deux satellites Phobos et Deimos. De plus, des rencontres proches entre la sonde et le satellite Phobos ont été régulièrement anticipées afin de pouvoir, d'une part, réaliser des images à une distance très faible, et d'autre part, obtenir une meilleure estimation de la masse de Phobos, par la perturbation gravitationnelle engendrée par celle-ci sur le mouvement de la sonde.

Avoir des éphémérides précises des deux satellites de Mars est l'un des points clés de cette entreprise. De nouvelles éphémérides ont donc été développées afin de pouvoir mener à bien ces objectifs. Un nouveau modèle dynamique des satellites, ainsi que l'utilisation d'observations spatiales très récentes ont été introduits.

La réalisation d'un nouveau modèle dynamique ajusté aux observations des satellites martiens est l'occasion de mettre à jour notre connaissance de la physique de ce système. En particulier, la forte dissipation martienne découverte dès 1945 par Sharpless reste aujourd'hui encore uniquement contrainte par l'étude du mouvement de Phobos. De plus, la grande précision des dernières observations spatiales offre désormais la possibilité de sonder la structure interne des satellites eux-mêmes, par l'ajustement de leur champ gravitationnel.

1. Un nouveau modèle dynamique

Les différents modèles dynamiques utilisés jusqu'au début des années 90 étaient tous analytiques. Toutefois, la nécessité d'introduire une modélisation plus complexe du système martien a rendu plus adéquat l'utilisation d'un modèle numérique. Ainsi, les effets de marées levées par Phobos et Deimos ont été introduits par un véritable potentiel perturbateur tiré de la formulation de Mignard (1980), plutôt que par l'introduction d'un terme quadratique en temps dans l'expression des longitudes moyennes des satellites.

Le potentiel gravitationnel martien a été repris de Tyler et al. (2003) jusqu'à l'ordre 10, et la fréquence de précession reprise de la résolution de l'UAI 2000. Les perturbations de Jupiter, Saturne, la Terre, la Lune et le Soleil ont été introduites par les éphémérides DE406.

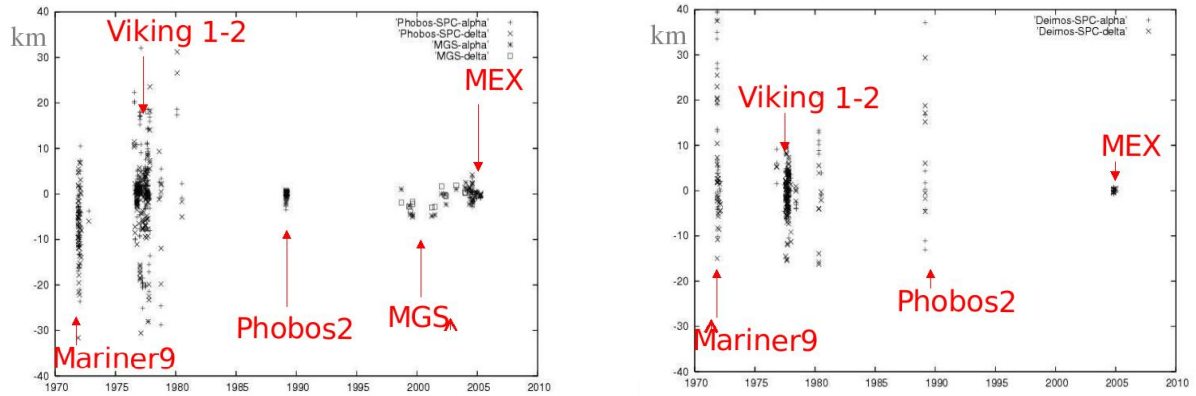
L'intégration des équations du mouvement a été réalisée par l'intermédiaire du logiciel NOE (Numerical orbit and Ephemerides), développé conjointement à l'IMCCE et l'ORB (Observatoire royal de Belgique). Ce logiciel intègre, en plus des équations du mouvement, les équations variationnelles du système, nécessaires pour pouvoir ajuster les conditions initiales et paramètres du système.

2. Le jeu d'observations

Le catalogue de T. Morley (1989) regroupant la quasi-totalité des observations réalisées depuis le sol a été utilisé, en particulier les toutes premières observations des satellites de Mars datant de 1877 à celles de grande qualité réalisées par D. Pascu à l'USNO (Washington).

A ce catalogue, l'ensemble des observations réalisées par les sondes spatiales Mariner 9, Viking 1, Viking 2, Phobos 2, Mars Global Surveyor et Mars Express a été ajouté. De même, un jeu de 196 observations non publiées et réalisées par Rhode, Ries et Pascu à Flagstaff en 2003 a été utilisé.

Durant l'ajustement, les positions et vitesses des satellites, le facteur de dissipation martien Q et les coefficients gravitationnels C_{20} et C_{22} de Phobos ont été ajustés. L'ajustement de ces deux derniers paramètres a été nécessaire afin d'obtenir de bons résidus pour l'ensemble des observations spatiales. Par une comparaison avec des valeurs théoriques issues d'une étude de la topographie de Phobos (Borderies, Yoder 1990), nous présumons que Phobos soit très hétérogène.



Résidus pour les observations spatiales après ajustement sur la position de Phobos (à gauche) et Deimos (à droite).

Conclusion

De nouvelles éphémérides des deux satellites martiens ont été développées à l'IMCCE et l'ORB. Celles-ci sont disponibles sur le serveur de l'IMCCE et via la librairie SPICE. Un ensemble d'observations datant de 1877 aux dernières images de la sonde Mars Express a été introduit. La précision externe de ces éphémérides est estimée à un kilomètre sur la période 1970-2010.

Nous avons confirmé la forte dissipation martienne avec une valeur pour le facteur de qualité $Q=79.91\pm 0.69$. Enfin, nous soupçonnons que Phobos soit un corps fortement hétérogène.

Références

- Borderies, N., Yoder, C. 1990 A&A, 233, 235
- Lainey, V., Dehant, V., Pätzold, M. 2006, A&A accepted.
- Mignard, F. 1980, Moon and Planets, 23, 185
- Morley, T. 1989, A&AS, 77, 209
- Tyler, L., Balmino, G., Hinson, D., et al. 2003, USA_NASA_JPL_MORS_1021
- Sharpless, B. 1945, AJ, 51, 185
- Standish, E. 1998, JPL IOM

La Formation permanente, une nécessité indispensable à la mise en œuvre des qualifications

Alain Montintin, correspondant formation permanente de l'I.M.C.C.E.

Introduction

Moyen d'appui important de la politique scientifique, levier de développement d'une politique de ressources humaines, la formation est également un droit qui concerne chacun : technicien, administratif, ingénieur et chercheur.

Cela implique que la participation à des formations, outre l'impulsion donnée par le responsable hiérarchique épaulé par le correspondant formation, soit aussi le fait d'initiatives émanant des personnels eux-mêmes.

La formation est non seulement le moyen d'accroître les compétences individuelles des agents mais aussi la clé de voûte de développement d'une culture collective dans le laboratoire.

1. L'organisation de la formation permanente à l'I.M.C.C.E.

Sous la responsabilité du Directeur du laboratoire, la politique de formation permanente du laboratoire est animée par le correspondant formation de l'unité.

Il est chargé :

- de la diffusion de l'information des actions de formations collectives organisées et/ou diffusées par la délégation régionale CNRS Ile de France Ouest et Nord de Meudon ainsi que par le secteur formation de l'Observatoire de Paris – Meudon – Nançay.
- de la prise en compte et de l'organisation des demandes individuelles des personnels.
- de préparer avec le Directeur, le Plan de Formation de l'Unité (P.F.U.) accompagné du Plan Annuel d'Action (P.A.A)

Le correspondant formation est le lien privilégié entre l'unité et le secteur formation de la délégation CNRS d'une part et de celui de l'Observatoire de Paris d'autre part.

2. Le Plan de Formation de l'Unité (P.F.U)

Pluriannuel et glissant, en général sur 4 ans, le Plan de Formation de l'Unité vise à mettre en avant les objectifs scientifiques du laboratoire à long terme, à justifier les demandes annuelles de financement des formations et à recenser les besoins en formation ainsi que les projets concernant l'évolution professionnelle ou la mobilité des personnels.

3. Le Plan Annuel d'Action (P.A.A)

Le plan Annuel d'Actions de formation complète le PFU. Il répertorie les besoins annuels en fonction des objectifs du PFU. Il informe sur de nouveaux projets du laboratoire. Il est élaboré après enquête auprès de tous les personnels du laboratoire. Il constitue la clé de voûte permettant d'étayer les demandes de financement des formations personnalisées auprès de la délégation CNRS comme du secteur formation de l'Observatoire.

4. Les principaux axes de formation retenus pour l'année 2006

- Accompagner les disciplines en évolution, mise en place de méthodes (pour une équipe ou pour l'ensemble de l'UMR) sur de grands projets scientifiques ou technologiques (projets logiciels).
- Formation à la diffusion de l'information scientifique et technique
- Poursuivre et actualiser la formation bureautique
- Maintenir et développer les techniques informatiques (réseau, systèmes et développement)
- Techniques de gestion et administration d'un laboratoire
- Formation générale (droit public, CEE, gestion du personnel, anglais intensif, sécurité du travail,...)
- Fonction d'encadrement/contexte international
- Aide à la promotion individuelle,
- Formation à l'édition,
- Formation à la gestion d'une bibliothèque
- Formation des chercheurs, rédaction d'articles, relations internationales

5. Bilan succinct des formations suivies en 2005 dans le cadre du plan pluriannuel

Participation de 15 ITA et 7 chercheurs et doctorants dans les domaines de l'informatique (systèmes, réseaux, Internet, langages de programmation), des logiciels de traitements d'images, retouches photos, édition, de la bureautique, de la gestion administrative, la gestion de bibliothèque, de l'hygiène et la sécurité, la préparation à la retraite, les écoles thématiques, les cours de langues étrangères, la formation au management.

Tests de la relativité à partir des observations des astéroïdes par le satellite astrométrique Gaia.

Daniel Hestroffer

1. Introduction

La mission européenne d'astrométrie spatiale Gaia permettra d'arpenter la galaxie et d'en fournir une carte en trois dimension en mesurant avec une grande précision la position (direction et parallaxe) et la vitesse (tangentielle ou mouvement propre ainsi que la vitesse radiale) d'environ un milliard d'étoiles, galaxies et autres QSOs (objets quasi-stellaires). Les retombées scientifiques d'une telle mission sont nombreuses ; on pourra consulter par exemple les actes du colloque "Gaia the 3D universe" [8]. Précisons simplement que Gaia est bien plus qu'un simple successeur de la mission Hipparcos puisque le télescope et l'instrumentation embarquée permettront sur les cinq ans de la mission des mesures de position cent fois plus précises et pour tout objet plus brillant que la magnitude $V \leq 20$, contrairement à Hipparcos qui était limité à observer au plus 120 000 corps célestes environs, tous plus brillants que la magnitude 12 pendant une mission d'une durée de trois ans. Plus proche de nous, Gaia – dans son balayage systématique du ciel – observera aussi des objets du système solaire (planètes, satellites naturels, comètes et astéroïdes). Le nombre de comètes (en activité) et d'objets trans-neptuniens observés sera relativement petit, le plus gros de la troupe étant constitué d'astéroïdes de la bande principale complété par un échantillon de géocroiseurs.

2. Les observables et les observations Gaia

On peut prédire le nombre d'astéroïdes plus brillant que la magnitude vingt observable par Gaia en extrapolant la courbe de distribution cumulée actuelle par une loi en puissance pour la distribution de taille. Cela donne une estimation d'environ 300 000 astéroïdes observables, valeur qui correspond au nombre d'astéroïdes (toutes catégories confondues) connus actuellement. Aussi, étant donné les progrès des grands relevés actuels quant à la complétude des catalogues, on peut affirmer que Gaia ne découvrira pas un grand nombre d'astéroïdes sur la période 2011-2016. Cependant, étant donné la loi particulière de balayage du ciel par le satellite, le télescope sera en mesure d'effectuer des observations dans des conditions normales à des elongations descendant jusqu'à 45° , permettant ainsi d'éventuelles découvertes d'objets gravitants à l'intérieur de l'orbite terrestre (IEOs) difficilement accessible depuis le sol.

Gaia reprend les principes de l'astrométrie globale du satellite Hipparcos avec une loi de balayage systématique du ciel empêchant toute observation 'classique' où l'on pointe la cible, mais où au contraire la cible est – comme c'est le cas pour les instruments méridiens – observée pendant le temps de son passage dans le champ du télescope par des CCD opérés en mode TDI (time delayed integration). La distribution temporelle et spatiale des observations des astéroïdes est alors variable ; elle dépend fortement de l'orbite du corps de sa brillance et des conditions initiales de la loi de balayage. On aura cependant, en moyenne par objet, une cinquantaine d'observations (passages) réparties de manière relativement uniforme en différentes époques (ou apparitions). Ce nombre peut-être fortement réduit pour des objets géocroiseurs dont une fraction importante de leur trajectoire est en deçà de l'elongation accessible à Gaia, ou bien encore dont la brillance est en deçà de la magnitude limite Gaia.

La précision des mesures est fonction essentiellement du bruit de photons (donc de la magnitude de l'objet). Notons que contrairement aux étoiles nous devons considérer la précision de la mesure pour un passage donné et non la précision obtenue en combinant l'ensemble des observations sur la durée de la mission. Ainsi la précision de parallaxe d'une étoile sera de l'ordre de $20 \mu\text{as}$ pour une étoile de magnitude $V=15$ tandis qu'une observation d'un astéroïde sera de l'ordre de $0,3 \text{ mas}$. Ces observations astrométriques de grande précision permettront de raffiner les orbites des astéroïdes et indirectement de pouvoir déterminer la masse des plus gros d'entre eux à partir de l'analyse des perturbations mutuelles (voir l'exposé de Serge Mouret) aussi bien que par détermination directe lorsqu'on observera un système binaire d'astéroïde. Par ailleurs ces observations astrométriques pourraient permettre de détecter des effets non gravitationnels sur les comètes ou un effet Yarkovski sur les corps plus petits. Signalons encore que les mesures photométriques (colorimétriques) donneront des informations sur la taxonomie ainsi que

sur la forme et la rotation d'un grand nombre de corps. Enfin, et c'est ce que nous aborderons ici, les orbites de grande précision ainsi obtenues permettront de tester la théorie de la relativité générale, principalement par la mesure du paramètre PPN β du quadripole du Soleil J_2 , de la variation de la constante gravitationnelle \dot{G} (test du principe d'équivalence), et du lien des systèmes de référence dynamiquement et cinématiquement non-tournants (vorticité de l'Univers).

3. Théorie de la relativité

Deux thèmes scientifiques auront marqué le XX^{ème} siècle de par l'intérêt qu'elles ont suscité dans le grand public, tout du moins dans le monde occidental : la psychanalyse de Freud (1895, 1919) et la théorie de la relativité d'Einstein (1905 pour la relativité restreinte et 1915 pour la relativité générale [2]). Très vite des théories alternatives à la relativité générale d'Einstein sont apparues, tout en restant des théories métriques ($ds^2 = g_{\mu\nu} x^\mu x^\nu$; $g_{\mu\nu} = h_{\mu\nu} + \eta_{\mu\nu}$). Dans le cas particulier d'un champ gravité faible ($G.M/c^2 \ll 1$) et en présence de vitesses faibles ($v/c^2 \ll 1$) elles ont pu être regroupées par Nordtvedt puis Will dans une formulation paramétrique appelée PPN pour Parameterized Post-Newtonian [5] (à ne pas confondre avec ppn pour post-post-Newtonian). Dans ce cas par exemple les équations du mouvement d'un corps dans un champ de N corps massifs supposés ponctuels s'écrivent par les équations d'Einstein-Infeld-Hoffmann [7, resolution UAI 2000 B1] où on reconnaît, à l'ordre zéro, la théorie de Newton dans un espace euclidien et inertiel.

Deux des dix paramètres PPN, γ et β , sont d'un intérêt particulier pour nous. Le paramètre γ correspond à la courbure de l'espace induite par unité de masse au repos et peut être lié aux observations et plus précisément à la déviation des rayons lumineux (géodésiques) par la courbure de l'espace dans le champ d'attraction gravitationnel du Soleil. Cette déviation atteint 1,75" au limbe du Soleil pour une étoile et sa mesure lors d'une éclipse totale de Soleil par Eddington fut un des premiers succès de la relativité générale (bien qu'il soit désormais bien établi que la mesure d'alors fut des plus imprécise...). Elle n'est cependant pas limitée aux seuls objets lointains et s'appliquait déjà pour Hipparcos aussi bien pour des corps dans le système solaire [3]. Le paramètre β représente la non-linéarité de la métrique de l'espace-temps et est relié à l'avance du périhélie des orbites. Là ce fut la prédiction de la précession anormale du périhélie de Mercure de 43"/siècle, observée déjà par Le Verrier à la moitié XIX^{ème} siècle, qui fournit le second test historique de la relativité générale d'Einstein.

Dans le cas de la relativité générale on doit avoir $\gamma = \beta = 1$ tandis que dans des théories alternatives (bien que métriques ou respectant le principe d'équivalence) on aura des valeurs différentes. La mesure de ces deux paramètres et plus particulièrement la quantification de leur écart par rapport à l'unité fournit par conséquent un test de la relativité générale. Différentes méthodes peuvent être employées pour ce genre de tests expérimentaux de la relativité [9, 10] en particulier la détermination des orbites et de leur périhélie de corps en révolution autour du Soleil. Cependant dans le cas des orbites il n'y pas que les termes relativistes qui vont entraîner des variations séculaires des éléments orbitaux d'une planète mais aussi les perturbations planétaires et des perturbations classiques dues à la non sphéricité du potentiel gravitationnel du Soleil, en particulier celles dues à son terme le plus important, le moment quadripolaire J_2 . En omettant pour l'instant les effets des perturbations planétaires qui d'ailleurs peuvent être déduits par les éphémérides avec toute la précision nécessaire, pour tout corps du système solaire on a alors une variation séculaire de l'argument du périhélie :

$$\dot{\omega} \propto \left(\frac{1}{a(1-e^2)} (2 + 2\gamma - \beta) ; \frac{1}{a^2(1-e^2)^2} J_2 \right)$$

Il apparaît alors qu'avec les observations d'un seul corps on ne peut séparer l'effet du quadripole solaire de l'effet relativiste, et que par conséquent il est préférable de considérer au moins deux corps de demi grand-axe et excentricité différents. Par ailleurs on voit que les orbites des corps proche du Soleil et de forte excentricité seront de meilleurs indicateurs car plus sensibles à ces effets. La figure 1 montre l'ampleur de l'avance relativiste du périhélie pour différents types d'orbites dans le système solaire. La dérivée temporelle de l'argument du périhélie ne s'annule pas lorsque l'excentricité est nulle, en revanche elle n'est pas mesurable de par la singularité des éléments elliptiques. Ainsi la quantité $e.d\omega$ est un meilleur indicateur de la sensibilité d'une orbite à ces effets. On voit dans la figure 1 que l'astéroïde géocroiseur Toutatis est – à qualité d'observation équivalente – un aussi bon candidat que ne l'est la planète Mercure, et que certains autres géocroiseurs à forte excentricité leur sont même supérieurs. L'idée d'utiliser l'analyse de l'orbite de l'astéroïde Toutatis à cet effet n'est pas nouvelle et a été étudiée par Sitarski et al. [6] avec cependant un succès limité essentiellement du à la qualité relativement insuffisante

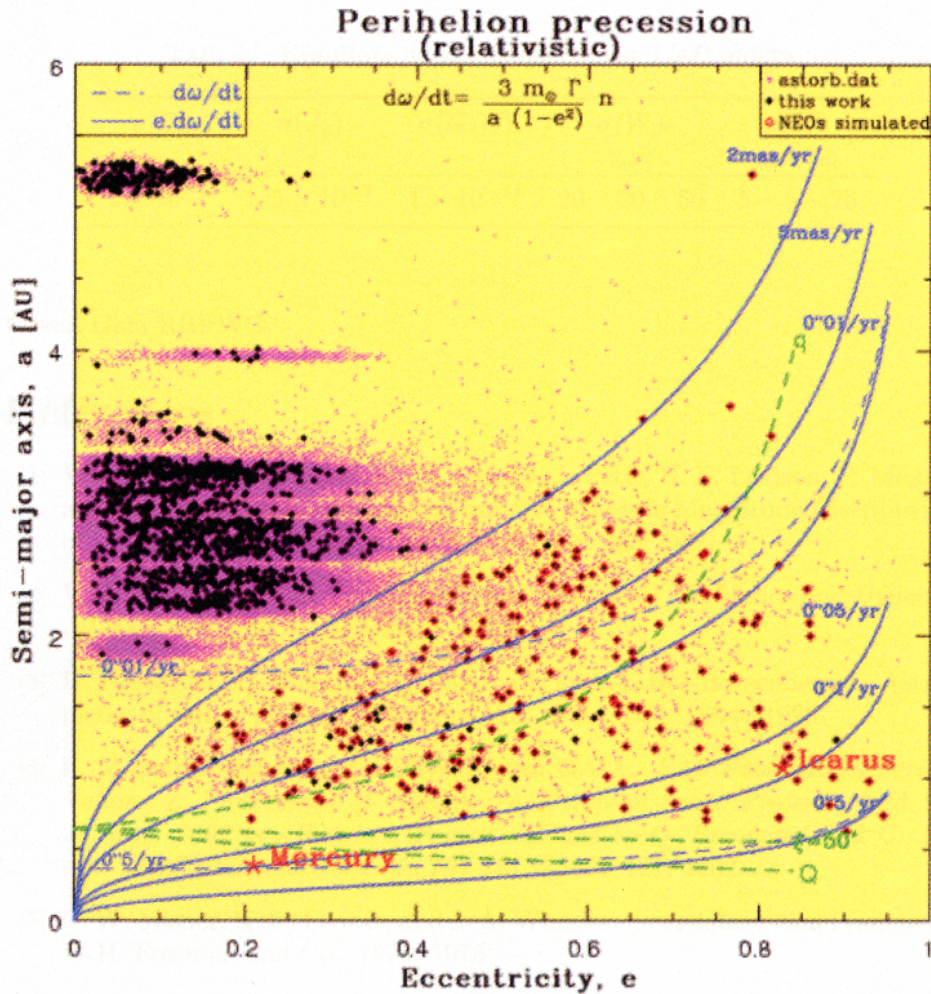


FIG. 1 – Précession relativiste du périhélie. On donne la distribution dans le plan (e, a) de l'ensemble des cibles potentielles y compris un échantillon débiaisé des géocroiseurs [1]. La valeur de la précession $d\omega/dt$ est donnée en traits discontinus et la sensibilité en traits continus par $e.d\omega/dt$.

des observations réparties sur quelques siècles. La situation est totalement différente lorsqu'on considère les observations astrométriques Gaia : bénéficiant de tous les avantages des observations dans l'espace et du fait de l'instrumentation les mesures seront environ 100 à 500 fois plus précises que les observations au sol d'il y a cinquante ans (avant l'ère des CCD) ; puisque effectuées par un seul instrument dans un cadre d'astrométrie globale et reliées automatiquement à un catalogue d'étoiles homogène et précis elles seront aussi plus exactes et moins entachées d'erreurs systématiques ou zonales que ne le sont des observations classiques obtenues sur différents télescopes ; enfin Gaia permettra l'observation d'un grand nombre de corps (particules tests) ce qui permettra de mieux séparer les effets relativistes des effets du quadripole solaire.

4. Prospective

Des simulations de la géométrie et de la distribution des observations Gaia pour 1500 astéroïdes donnent les résultats de la table 1. La précision escomptée pour le paramètre β , compte-tenu que γ sera connu avec toute la précision nécessaire à partir, par exemple, de l'analyse des observations des étoiles Gaia, est de l'ordre de 10^{-4} . La précision attendue pour le moment quadripolaire du Soleil est de 10^{-7} . Valeurs en accord avec les calculs préliminaires [4] obtenus par une méthode. La simulation effectuée ici est limitée à un nombre restreint d'objets par rapport aux 300 000 évoqués plus haut, mais comme nous avons considéré un échantillon a priori complet des géocroiseurs ces précisions ne devraient pas changer

de manière drastique. Par conséquent Gaia permettra une mesure du J_2 solaire et du paramètre PPN β avec une précision similaire à celle obtenue actuellement par d'autres techniques [10], mais néanmoins de manière directe et simultanée (sans hypothèse sur le modèle d'atmosphère solaire combiné à des mesures d'héliosismologie, ni par le biais de l'effet Nordtvedt en supposant la relation $\eta = 4\beta - \gamma - 3$) et sur une plus grande gamme de distance dans le champ de gravité solaire. La situation est, en revanche, plus prometteuse pour les variations de G et W . Néanmoins il nous faudra analyser les possibles sources d'erreurs systématiques en particulier le mouvement des géocroiseurs et le déplacement du photocentre.

TAB. 1 – Résultats de la simulation sur 1500 objets.

$\sigma(\beta)$	$\sigma(J_2)$	$\sigma(\dot{G}/G)$	$\sigma(W)$	$\sigma(\dot{W})$
–	–	–	[μas]	[$\mu\text{as}/\text{an}$]
2×10^{-3}	$1,5 \times 10^{-7}$	1×10^{-11}	20 – 20 – 50	5 – 5 – 20

Remerciements: Je tiens à remercier F. Mignard (OCA, Nice), S. Klioner (Lohman observatory, Dresden), J. Berthier et S. Mouret (IMCCE) pour leur aide et contributions diverses et précieuses à ce travail ainsi qu'au groupe de travail Gaia RRFWG.

Références

- [1] W.F. Bottke, A. Morbidelli, R. Jedicke, J. Petit, H.F. Levison, P. Michel and T.S. Metcalfe. Debiased Orbital and Absolute Magnitude Distribution of the Near-Earth Objects. *Icarus*, 156:399–433, 2002.
- [2] V.A. Brumberg. 100 Years of relativity. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 91:1ñ2, January 2005.
- [3] D. Hestroffer, B. Morando, F. Mignard and A. Bec-Borsenberger. Astrometry of minor planets with hipparcos. *A&A*, 304:168+, 1995.
- [4] F. Mignard. Fundamental Physics with GAIA. *EAS Publications Series Volume2, Proceedings of iGAIA: A European Space Project, held 14-18 May, 2001 Les Houches, France*. Edited by O. Bienaymé and C. Turon. EDP Sciences, 2:107–121, 2002.
- [5] C.W. Misner, K.S. Thorne and J.A. Wheeler. *Gravitation*. San Francisco: W.H. Freeman and Co., 1973.
- [6] G. Sitarski. On the relativistic motion of (1566) Icarus. *AJ*, 104:1226–1229, 1992.
- [7] M. Soffel, S.A. Klioner, G. Petit, P. Wolf, S.M. Kopeikin, P. Bretagnon, V.A. Brumberg, N. Capitaine, T. Damour, T. Fukushima, B. Guinot, T.Y. Huang, L. Lindgren, C. Ma, K. Nordtvedt, J.C. Ries, P.K. Seidelmann, D. Vokrouhlický, C.M. Will and C. Xu. The IAU 2000 Resolutions for Astrometry, Celestial Mechanics, and Metrology in the Relativistic Framework: Explanatory Supplement. *AJ*, 126:2687–2706, December 2003.
- [8] C. Turon, K.S. O'Flaherty and M.A.C. Perryman, editors. *The Three Dimensional Universe with Gaia*, January 2005.
- [9] C.M. Will. Special Relativity: A Centenary Perspective. *ArXiv General Relativity and Quantum Cosmology e-prints*, April 2005.
- [10] C.M. Will. Was Einstein Right? Testing Relativity at the Centenary. *ArXiv General Relativity and Quantum Cosmology e-prints*, April 2005.

Les métiers de l'édition Étude d'un cas particulier

Sylvie Lemaître

Les métiers de l'édition vont de la naissance d'un projet à la mise à disposition du produit au public en passant par sa réalisation et sa fabrication. Le responsable édition dans une structure telle que l'IMCCE a des compétences de généraliste : il gère le projet tout au long de la chaîne éditoriale assurant la conception et la rédaction jusqu'à la remise du bon à tirer à l'imprimeur et organise les moyens de diffusion auprès du public. Il peut avoir recours lors de ce processus à des spécialistes de certains métiers de l'édition. La plaquette est un produit type et c'est à travers ce projet que nous étudierons la réalisation d'un projet et la chaîne éditoriale.

1. Naissance d'un projet

La naissance d'un projet peut résulter de plusieurs événements :

- d'une demande : cas assez fréquent, il simplifie les étapes de la conception puisqu'on a déjà une idée de ce qui est attendu. La demande peut venir de l'éditeur qui souhaite compléter ou développer son catalogue vers un domaine particulier. Le public peut aussi être à l'origine d'une demande, qu'il soit amateur ou professionnel, et se manifeste souvent à l'occasion d'échanges directs au cours de rencontres.
- d'un besoin : on identifie dans ce cas l'absence d'un produit dont on aurait pu avoir l'utilité. C'est le cas pour la plaquette : depuis notre changement de statut en 1998, nous n'avons rien à diffuser d'officiel et de cohérent à nos différents contacts : collaborations, tutelles, fournisseurs, public.
- d'un vide : on constate qu'il peut y avoir un manque mais qu'il n'y a pas encore eu de demande. Dans ce cas, on anticipe la demande et on crée le besoin.
- d'une réflexion : c'est souvent le cas d'une réflexion de groupe spontanée dans une réunion (au sens large, réunion de travail ou rassemblement de personnes) dont l'objet n'avait pas de lien avec l'idée qui émerge.

2. Création d'un comité de rédaction

Quand l'idée du projet est née, il faut la concrétiser. C'est par la création du comité de rédaction que l'on enclenche vraiment le processus de réalisation d'un projet. Le responsable d'édition réfléchit avec les initiateurs du projet aux personnes susceptibles de faire partie de ce comité de rédaction. Il y a deux critères de choix principaux de ces personnes :

- un critère basé sur les compétences : en fonction du projet, certaines compétences sont incontournables et les personnes possédant ces compétences doivent faire partie du comité de rédaction. Par exemple, pour *Le manuel des éclipses*, Patrick Rocher devait être un membre obligatoire du comité de rédaction.
- un critère basé sur le volontariat : dans ce cas les compétences générales de chacun peuvent suffire à faire démarrer le projet et un appel est lancé aux interlocuteurs pour être membre volontaire. C'était le cas pour la plaquette : c'est un projet commun auquel chacun pouvait participer du simple fait de son appartenance à l'IMCCE. Les compétences de chacun sont exploitées dans un deuxième temps.

3. Les premières décisions du comité de rédaction

Le comité de rédaction doit en premier lieu définir certaines caractéristiques du projet, dont dépendra le contenu.

a. la cible

Avant de travailler sur le contenu du projet, il faut en définir la cible : quel lecteur, quel utilisateur ? Il faut pour cela savoir répondre à quelques questions. Quel sera l'ensemble des personnes qui devront être atteintes par le produit final ? Quel niveau de compréhension ? Quel objectif d'utilisation ? Dans le cas de la plaquette, la cible est large puisqu'elle comprend à la fois nos tutelles, nos collaborateurs scientifiques et le public.

b. l'objectif

Quand la cible est définie, il faut déterminer l'objectif à atteindre pour cette cible. Pour la plaquette, l'objectif est, d'une part pour ceux qui ne nous connaissent pas, de nous présenter de la façon la plus complète possible et d'autre part pour ceux qui nous connaissent déjà, de montrer l'étendue de nos activités.

c. le format

Le format est une part importante de la réussite d'un projet. Il doit satisfaire la cible et être conforme à l'utilisation attendue. Pour la plaquette, le format A4 ne convenait pas par son encombrement. Toutefois un format trop petit n'aurait pu contenir l'information qu'on pensait y mettre. À partir d'exemples concrets, nous avons pu définir qu'un format 17x24 était satisfaisant et assurait une certaine homogénéité de nos documents puisque c'est aussi le format de notre rapport d'activité.

d. le nombre de pages

Ceci revient à identifier le volume d'information à insérer et déjà à commencer à affiner le contenu. Pour la plaquette, le format et la destination nous ont limité à un document de 12 pages. Augmenter nous aurait contraint à un 16 pages et n'aurait plus eu l'usage d'une plaquette mais davantage d'un document descriptif détaillé. Diminuer n'aurait pu contenir le volume d'information souhaité.

4. La mise en forme : la maquette

Pour une conception simple, le responsable d'édition peut s'en charger en interne. Par exemple, c'est le cas des couvertures et de la mise en page de certains documents standards ou pour des réalisations de maquette simple. Techniquement les outils de PAO sont connus du responsable d'édition mais lorsqu'il s'agit de mise en forme complexe et surtout d'une recherche de créativité, alors il doit faire appel à des spécialistes dont les compétences sont certes techniques mais surtout artistiques. Ces spécialistes sont les maquettistes ou les créatifs.

Cela suppose de prendre plusieurs contacts et de créer un réseau, de demander des devis et de faire des choix. Quand le choix est fait, il faut présenter le projet et son cahier des charges c'est-à-dire l'ensemble des contraintes fixées, l'objectif, l'esprit que le produit final devra dégager. Pour la plaquette, il était préférable de choisir un interlocuteur qui nous connaissait déjà, était imprégné de la culture de l'IMCCE pour la transmettre dans le projet. Bien informé, le maquettiste peut alors faire des propositions qui sont débattues au sein du comité de rédaction. Le comité essaie alors de choisir une orientation dans les différentes propositions et il s'ensuit une succession d'allers-retours avec le créatif jusqu'à obtenir quelque chose de satisfaisant.

5. La définition du contenu

Au sein du comité, il faut établir quel sera le contenu. Pour un livre, il faut définir les chapitres. Pour la plaquette, il fallait déterminer les grandes lignes à mettre en valeur qui sont la présentation de l'institut, la recherche, les éphémérides et les publications. Une fois le contenu précisé, il faut évaluer quelles sont les compétences au sein du comité, celles qui sont manquantes et identifier les personnes qui ont ces compétences et les solliciter. Par exemple, dans *Le manuel des éclipses*, nous avons voulu intégrer un chapitre historique sur les éclipses. Nous n'en avions pas les compétences mais nous avons identifié Michel Lerner comme étant un auteur potentiel qui a accepté de travailler avec nous sur ce projet. Pour la plaquette, nous avons pensé que les thèmes scientifiques seraient mieux présentés par leurs acteurs que par le comité. Chacun a donc été sollicité.

6. La rédaction du contenu

Quand le contenu et les compétences sont établis, les travaux de rédaction peuvent être répartis. Au sein du comité, le travail est d'abord réparti par compétences logique, ensuite entre les volontaires et enfin par obligation pour certaines parties qui ne peuvent pas être réparties selon les deux premières catégories. Ensuite, il faut attribuer les textes des personnes extérieures au comité que l'on va solliciter, et préparer aussi les contraintes liées à ces textes : volume, niveau de compréhension, traduction, illustrations, délai.

Les textes rédigés doivent être rassemblés, confrontés, disposés dans la maquette, traduits et vérifiés. Les illustrations doivent faire l'objet du même soin : recueillir des images de haute définition, rédiger les légendes, trouver les crédits, assembler texte et illustration.

Enfin en cas de problème ou d'imprévu, il faut envisager une alternative. Par exemple si une personne sollicitée pour un texte ne nous remet rien, il faut définir si on peut se passer de son texte ou bien le rédiger à sa place au sein du comité avec les moyens qui sont à notre disposition.

7. La fabrication

La fabrication, quand elle est simple, c'est-à-dire quand elle ne requiert pas une impression haute qualité en quadrichromie ou un façonnage spécial, peut être réalisée en interne ou au service reprographie de Meudon. Mais une qualité d'impression élevée et un façonnage particulier exigent le recours à un imprimeur. Cela nécessite comme pour le maquettiste de prendre des contacts, créer un réseau, demander des devis, faire des choix. Le choix d'un bon imprimeur se fait selon plusieurs critères :

- le coût : c'est le premier élément regardé pour savoir si le prix de la prestation correspond à la concurrence, mais il n'est pas le critère le plus déterminant ;
- la qualité du produit fini : en examinant avec minutie un produit fini on peut y déceler des imperfections qui révèlent le sérieux ou non de l'imprimerie : problème de calage, qualité de la quadri, massicotage, façonnage, emballage ;
- la réactivité : c'est la facilité qu'a l'imprimerie à répondre à une demande, y compris pressante, sans nuire à la qualité ;
- le professionnalisme : c'est la capacité à déceler des erreurs y compris les nôtres, à gérer des problèmes, à nous conseiller. Cela se mesure aussi au taux d'implication face à un projet : le projet en imprimerie est-il juste le remplissage de feuilles de papier dans des machines ou bien est-ce un tout qui est contrôlé à chaque étape de sa fabrication pour aboutir au résultat souhaité par le client ?

8. La diffusion

Quand le produit est livré fini, il faut le mettre à la disposition du public. Il peut s'agir de vente par correspondance comme nous le faisons pour certains de nos ouvrages (notes techniques, calendrier républicain, ...).

Si le produit n'est pas destiné à être vendu, il est distribué lors de nos contacts et rencontres, ou envoyé gratuitement à des destinataires bien définis : c'est le cas de la plaquette.

Enfin, si l'ouvrage est destiné à la vente et s'il s'adresse à un public conséquent, il doit être diffusé par l'intermédiaire d'un éditeur. Dans ce cas les contacts se prennent au moment de la naissance du projet. On peut solliciter plusieurs éditeurs, ou faire confiance à notre éditeur phare EDP Sciences qui souhaite toujours enrichir son catalogue de produits liés à notre activité et chez qui nous trouvons un écho favorable à nos projets. Dans cette hypothèse, un certain nombre de contraintes interviennent : choix du contrat, rédaction du contrat, prix, délais, échéances.

Conclusion : comprendre la chaîne éditoriale pour bien interagir

Il y a beaucoup d'interlocuteurs dans la réalisation d'un projet éditorial et le désistement de l'un d'eux peut mettre en péril le projet dans son ensemble. Pourquoi est-il nécessaire de bien connaître la chaîne éditoriale ?

- pour le responsable d'édition, il est nécessaire de connaître toute la chaîne éditoriale pour mieux anticiper les contraintes : délais, coûts, techniques, imprévus ;
- pour les auteurs et interlocuteurs, connaître toutes ces contraintes et avoir une vue d'ensemble permet de mieux adapter la réponse aux demandes du responsable.

Enfin la qualité du résultat d'un projet est pour l'extérieur un reflet de la qualité de nos activités au sein de l'institut d'où l'importance d'apporter ensemble le plus grand soin à la réalisation de nos projets.

Les différents types de théories du mouvement des corps du système solaire

A. Vienne

1. Introduction

Les théories du mouvement des corps du système solaire ont beaucoup changé dans leur forme. Avant l'ère des calculateurs électroniques, on s'attachait surtout à obtenir une forme analytique. On ne faisait intervenir des coefficients numériques que si la complexité du problème l'imposait. Ensuite, la puissance des calculateurs augmentant, les mécaniciens célestes eurent de moins en moins de gêne à utiliser des méthodes numériques. C'est ainsi que l'on qualifiait les théories du mouvement d'analytique, de semi-analytique, de semi-numérique. On attachait même une certaine importance à utiliser le qualificatif exact pour désigner la théorie. Aujourd'hui, cela est tombé en désuétude. Toutefois, l'utilisation actuelle de théories synthétiques invite à s'interroger à nouveau sur le sens de ces mots. En effet, les théories synthétiques partent du tout numérique pour revenir ensuite à une représentation qui contient des informations similaires aux représentations analytiques.

Il ne s'agit donc pas ici de décrire les théories en général ni les théories synthétiques en particulier. On pourra, pour en obtenir un aperçu et des références, se reporter à l'article de Luc Duriez dans ce même volume [2006]. Après avoir présenté les qualificatifs qui désignaient les différents types de théories, on précise l'origine des théories synthétiques et leur utilité actuellement. Plus que le qualificatif désignant une théorie ou une représentation, ce sont les méthodes utilisées, les buts poursuivis et les informations présentes qui importent de connaître.

2. Définitions des qualificatifs utilisés

Au début des années 80, on pensait encore pouvoir donner une sorte de nomenclature. Chapront-Touzé [1982] a tenté de définir les différents types de théories. Même si cela apparaît quelque peu désespéré, il est intéressant de donner ses définitions :

- Analytique: les coefficients de Fourier sont des développements littéraux de tous les paramètres.
- Semi-Numérique: les coefficients de Fourier sont numériques, une valeur définitive est donnée au début des calculs. Des dérivées partielles premières sont aussi calculées.
- Certains paramètres (par exemple les excentricités et inclinaisons) apparaissent de manière littérale alors que d'autres (comme les masses) sont numériques.
- Semi-analytique: les coefficients de Fourier sont des développements autour de valeurs fixées.

Cette répartition a été faite dans le contexte des théories du mouvement de la Lune dont Chapront-Touzé est une spécialiste et les exemples qu'elle donne en sont issus. Ainsi les théories de Delaunay (1867) et de Deprit (1971) sont déclarées analytiques. Nous pouvons ajouter dans cette catégorie la "Théorie générale planétaire" de Duriez [1977]. Chapront-Touzé fait rentrer dans la deuxième catégorie sa propre théorie de la Lune [1983]. Elle remarque que les théories analytiques sont environ 100 fois moins précises que les théories semi-numériques. Il ne faudrait pas en conclure qu'on ne construit plus de théorie analytique. Par exemple, De Saedler [2006] a construit une théorie analytique fermée (ie: non développée en excentricité-inclinaison) du mouvement d'un satellite artificiel de la Lune. Ce type d'approche est très utile en analyse de missions spatiales.

Les deux dernières catégories ne sont pas considérées. D'ailleurs, le qualificatif "semi-analytique" est rarement utilisé dans le sens indiqué ci-dessus.

Actuellement, beaucoup de dynamiciens considèrent que “analytique” (“semi” ou pas) est à réserver aux solutions qui ont leur origine dans la théorie des perturbations et que si certains paramètres sont donnés numériquement alors le mot “semi” est à ajouter. De ce point de vue, aucune théorie ne peut être considérée comme purement analytique. D’autres dynamiciens ont une vue encore plus large: ils considèrent numérique ce qui est issu d’une intégration numérique, autrement la représentation est dite analytique. Plus précisément, l’analyticité provient de la présence littérale du paramètre t (le temps) permettant alors de remplacer t , a priori, par n’importe quelle valeur, alors qu’une intégration numérique ne permet de déduire des positions que sur l’intervalle où a été effectuée l’intégration. Cette dernière distinction est elle aussi insatisfaisante, puisque dans ce sens, une théorie analytique issue de la théorie des perturbations n’est valable, elle aussi, que sur un intervalle de temps limité.

3. Les autres théories du mouvement à l’IMCCE

Laissons de côté, au moins pour l’instant, les théories qui ne servent pas à fournir des  ph m rides. Il s’agit des théories de type théorie générale déjà citées, de la solution planétaire de Laskar [1988] ou des études théoriques sur les systèmes de satellites naturels. Outre les éphémérides issues d’intégrations numériques, il y a ce nous appellerons pour notre part les théories semi-analytiques: ELP pour la Lune déjà citée et VSOP de Bretagnon [1982] pour les 8 principales planètes du système solaire. Ce sont des solutions issues de la théorie des perturbations obtenues par des méthodes itératives. Dans cette catégorie, on peut encore ajouter ESAPHO-ESADE pour les deux satellites de Mars faite par Chapront-Touzé [1990] sur le même modèle que ELP.

La théorie du mouvement des satellites d’Uranus de Laskar [1986] est intéressante pour notre discussion. Elle est analytique et même “fortement” analytique d’après les critères donnés dans la section précédente. En effet, elle a été construite avec les programmes de la théorie générale planétaire de Duriez [1977], améliorés à l’ordre 2 des masses pour l’étude des 8 grosses planètes sur un million puis dix millions d’années par Laskar [1988]. Pourtant, elle a un caractère numérique assez fort puisque, par exemple, les valeurs numériques des modes propres du système ont été ajustées sur une intégration numérique. Ces valeurs sont ainsi les plus proches possibles des valeurs réelles. De toutes façons, le résultat final est une représentation de la solution sous une forme quasi-périodique: chaque élément d’orbite de chaque satellite est une série de Fourier (finie) dont chaque terme est défini par une amplitude réelle et un argument donné comme combinaison entière d’arguments fondamentaux. Ces arguments fondamentaux sont généralement les modes propres du système et sont donnés numériquement.

La représentation du mouvement des 8 principaux satellites de Saturne de Vienne et Duriez [1995] [1997] a une forme identique. Pourtant, la partie à longue période de la solution est issue d’une intégration numérique. La forme quasi-périodique a été restituée grâce à une analyse en fréquence. On parle alors de théorie synthétique. La séparation entre le système différentiel à courte et à longue période a été faite analytiquement avec les mêmes outils que précédemment. La partie à courte période ne posant aucun problème a été intégré analytiquement.

La théorie du mouvement des satellites galiléens de Jupiter de Lainey [2002] possède elle aussi une forme identique. Elle est entièrement synthétique puisqu’issue d’une intégration numérique des équations de Newton. C’est encore une analyse harmonique qui permet de retrouver la forme quasi-périodique et notamment de reconnaître les inégalités à courtes périodes, à longues périodes, le mode propre issu de la résonance laplacienne, ...

4. Les théories synthétiques

Une théorie synthétique est donc une représentation du mouvement construite en 3 étapes :

- Il faut d’abord définir un modèle physique et se donner un jeu de conditions initiales. Il se pose ici tout le problème de l’ajustement aux observations que l’on n’aborde pas ici.
- On obtient ensuite une solution (discrète) par intégration numérique.
- La dernière phase est celle de l’analyse qui permet d’écrire la solution ”comme” si elle était analytique.

On remarque que dans cette dernière phase, on suppose connue (ou on croit connaître) au moins la forme de la solution. Dans l'exemple des satellites de Jupiter et Saturne donné ci-dessus, il s'agit d'une forme quasi-périodique et donc d'une solution supposée stable.

Le mot "synthétique" a été utilisé pour la première fois par Carpino et al [1987] pour leur projet LONGSTOP. Celui-ci consiste en l'étude de la stabilité du système des 4 grosses planètes du système solaire. Leur but était surtout de compresser la grande masse de données issues de l'intégration numérique et aussi d'effectuer des comparaisons directes avec des résultats analytiques obtenus par d'autres auteurs.

En fait l'idée est plus ancienne. Elle remonte au moins à Kovalevsky [1959]. Il a appliqué une méthode similaire au mouvement du satellite VIII (Pasiphaé) de Jupiter. Son but était de prouver qu'une telle solution pouvait servir de point de départ à un calcul par itérations et donc aussi à une théorie générale (ie: non limitée à un intervalle donné). Elle permet aussi d'expliquer les inégalités obtenues. Il est intéressant de noter que Kovalevsky affirme, à propos de ces séries que l'on qualifierait aujourd'hui de synthétique, que "Les séries publiées ont toutes les caractéristiques d'une solution analytique". Un peu plus loin il parle de "représentation analytique" et même de "théorie analytique".

Laskar [1988] a étudié l'évolution séculaire du système solaire sur 10 millions d'années. Son étude concerne les 8 planètes selon une méthode quasiment identique à celle de TASS puisque Vienne & Duriez [1995] s'en étaient inspirés. Il a donc obtenu une solution synthétique du mouvement de ces corps. La forme de cette représentation est très utile pour d'autres études théoriques comme par exemple celle de Noyelles [2006]. Elle a aussi été à l'origine de l'étude de la stabilité du système solaire.

5. Conclusion

Dans sa thèse de [1959] Kovalevsky écrivait: "A l'origine, on avait espéré pouvoir donner des expressions littérales aux coefficients des séries de Fourier. Il aurait alors suffi de remplacer les paramètres par leur valeur numérique pour avoir la représentation du mouvement d'un système donné." Cet idéal est abandonné depuis longtemps. Toutes les théories dynamiques ont, à des degrés diverses, mêmes celles que l'on qualifie d'analytique, une composante numérique. Le qualificatif exact à employer est sans importance. Ce qui importe pour l'utilisateur est l'information (précision, inégalités, ...) qu'elle contient et son domaine de validité. Pour le dynamiqueien, il lui importe de savoir en plus comment a été construite cette théorie.

Les théories synthétiques partent du numérique pour revenir vers une "forme analytique". Cette forme peut être celle obtenue ou qu'on obtiendrait dans la construction d'une théorie vraiment analytique. On voit ici les limites de l'exercice. Ces théories synthétiques ont des buts variés. Réduire la quantité de données issues d'une intégration numérique comme dans le projet LONGSTOP est un but qui lui est propre. Les autres buts sont communs à toute théorie du mouvement: servir de point de départ à un calcul itératif des équations, effectuer des comparaisons, comprendre les perturbations en jeu dans le système, utilisation dans une autre étude théorique, ...

Remerciements

Mes remerciements vont à Luc Duriez pour avoir accepté de relire ces quelques pages. Plus généralement, je tiens à souligner ici son apport scientifique dans le domaine des théories du mouvement. En effet, le lecteur attentif aura compris que beaucoup des résultats actuels sur ce sujet sont issus directement de ses travaux sur l'élaboration d'une théorie générale planétaire. Ces résultats concernent bien sûr la stabilité du système solaire mais aussi l'élaboration d'éphémérides et recherches théoriques sur les systèmes de satellites planétaires.

References

- [1982] Bretagnon P. 1982 "Theory for the motion of all the planets - The VSOP82 solution" A&A 114, 278-288.
- [1987] Carpino X., Milani A., Nobili X. 1987 "Long-term numerical integrations and synthetic theories for the motion of the outer planets" A&A 181, 182-194.

- [1982] Chapront-Touzé M. 1982 “Progress in the analytical theories for the orbital motion of the moon”, *Celest. Mech. & Dyn. Astr.* 26, 53-62).
- [1983] Chapront-Touzé M., Chapront J. 1983 “The lunar ephemeris ELP 2000” *A&A* 124, 50-62.
- [1990] Chapront-Touzé M. 1990 “Orbits of the Martian satellites from ESAPHO and ESADE theories” *A&A* 240, 159-172.
- [2006] De Saedeleer B. 2006, “Théorie analytique fermée d’un satellite artificiel lunaire pour l’analyse de mission”, Thèse Namur.
- [1977] Duriez L. 1977 “General planetary theory in elliptic variables. - Expansion of the equations” *A&A* 54, 93-112.
- [2006] Duriez L. 2006 “Analyse en fréquence de haute précision , appliquée aux mouvements des satellites galiléens de Jupiter”, ce volume.
- [1997] Duriez L., Vienne A. 1997, “Theory of motion and ephemerides of Hyperion.” *A&A*, 324, 366-380.
- [1959] Kovalevsky J. 1959, “Méthode numérique de calcul des perturbations générales. Applications au VIII satellite de Jupiter”, Thèse Obs. Paris.
- [2002] Lainey V. 2002, “Théorie dynamique des satellites galiléens.”, Thèse Obs. Paris.
- [2002] Lainey V., Duriez L., Vienne A. 2006, “Synthetic representation of the Galilean satellites orbital motions from L1 ephemerides”, *A&A* 456, 783-788.
- [1986] Laskar J. 1986 “A general theory for the Uranian satellites” *A&A* 166, 349-358.
- [1988] Laskar J. 1988 “Secular evolution of the solar system over 10 million years” *A&A* 198, 341-362.
- [2006] Noyelles B. “L’inégalité de De Haerdtl: une richesse dynamique insoupçonnée dans le système des satellites galiléens”, ce volume.
- [1995] Vienne A., Duriez L. 1995, “TASS1.6 : Ephemerides of the major Saturnian satellites”, *A&A* 297, 588-605.

Le système double d'Antiope

P. Descamps^a, F. Marchis^b, T. Michalowski^c, F. Vachier^a, F. Colas^a, J. Berthier^a, M. Assafin^d,
P. B. Dunckel^e, M. Polinska^c, W. Pych^g, D. Hestroffer^a, K. Miller^f, R. Vieira-Martins^d, M. Birlan^a, J.-P. Teng-
Chuen-Yu^h, A. Peyrot^h, B. Payet^h, J. Dorseuil^h, Y. Léonie^h, T. Dijoux^h

^a Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides, Observatoire de Paris, 75014 Paris

^b University of California at Berkeley, Department of Astronomy, 601 Campbell Hall, Berkeley, CA 94720, USA

^c Astronomical Observatory, Adam Mickiewicz University, Sloneczna 36, 60-286 Poznan, Poland

^d Observatório do Valongo/UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro,

Rua Ladeira Pedro Antonio, 43 CEP 20080-090 Rio de Janeiro, Brazil

^e 52 Seventh Avenue, San Francisco, CA 94118

^f Lick Observatory

^g Nicolaus Copernicus Astronomical Center, ul. Bartycka 18, 00-716 Warszawa, Poland

^h Makes Observatory, Reunion Island

1. Introduction

L'astéroïde 90 Antiope appartient à la ceinture principale, c'est-à-dire que son orbite autour du Soleil se situe entre Mars et Jupiter. L'essentiel de ce que l'on connaît de cet astéroïde a été découvert de partir de 1996 seulement, date à laquelle fut réalisée la première détermination de sa période de rotation.

Puis, assez rapidement, en août 2000, des observations réalisées sous optique adaptative révélèrent qu'Antiope n'était pas UN astéroïde mais plutôt DEUX astéroïdes similaires en taille. Antiope devint ainsi le premier astéroïde double jamais détecté.

Assez rapidement il commença à intriguer. En effet jusqu'à ce jour aucune explication plausible de son origine n'a été encore trouvée. Ce système est composé de deux objets quasi-sphériques, semblables en dimension (~90km de diamètre) séparés par une distance de l'ordre de 170km. Le système est parfaitement synchronisé. En d'autres termes, la période de rotation est égale à la période de révolution orbitale d'une des composantes autour de l'autre. Ceci en fait un système identique à celui formé par le couple Pluton-Charon.

Rechercher une explication à la formation de ce couple nécessite de parfaitement le connaître. Pour cela nous avons réalisé dans un premier temps une campagne d'observations astrométriques afin de caractériser très précisément l'orbite. Ceci n'a pu être fait qu'avec le concours des moyens d'observation les plus imposants en taille de télescope et en technique haute résolution. Enfin, une campagne d'observations photométriques de phénomènes mutuels a permis déterminer très précisément les propriétés physiques.

2. Observations astrométriques en optique adaptative

De janvier 2003 à juillet 2005, nous avons pu collecter une vingtaine d'observations de positions relatives des composantes d'Antiope. L'aspect très changeant que le système présente à un observateur terrestre permet de déterminer très précisément le pôle de rotation qui est également le pôle de révolution orbitale. En d'autres termes, le plan orbital est confondu avec le plan équatorial. Dans ce plan, les deux composantes du système tournent l'une autour de l'autre en décrivant un cercle avec une période de 16.505h.

Grâce à ces observations astrométriques, nous avons donc obtenu une solution complète en termes d'éléments orbitaux. Ce faisant il est alors devenu possible d'effectuer des prédictions de phénomènes entre les deux composantes. Il s'agissait donc de déterminer les dates d'occultations et d'éclipses mutuelles obtenues lorsque le plan orbital se retrouve confondu avec la ligne de visée pour un observateur terrestre. Nos prédictions ont alors montré que ces phénomènes mutuels devaient se produire au sein du système d'Antiope dès 2005. C'est pourquoi nous avons très rapidement organisé une campagne internationale d'observation de ces phénomènes.

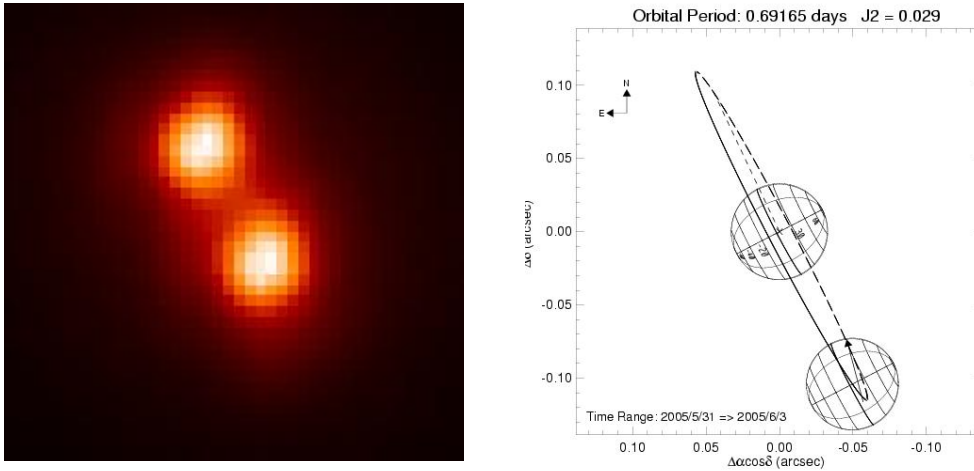


Fig.1 : Image d'Antiope faite sur le télescope de 10m du Keck le 31 mai 2005. La figure de droite montre l'aspect apparent du système à cet instant.. On constate que le plan orbital est encore légèrement ouvert sur la ligne de visée, on n'a donc pas encore atteint le maximum de la période des phénomènes.

3. Observations photométriques des phénomènes mutuels de 2005

Antiope est un astéroïde relativement brillant (magnitude 14 dans le visible), ceci le rend facilement observable à partir de télescopes de taille modeste (diamètres allant de 20cm à 1m). D'autre part la période correspondant aux phénomènes les plus marqués correspondait à peu de choses près avec l'opposition d'Antiope, c'est-à-dire en juillet 2005.

Nous avons donc pu réaliser et collecter une quarantaine de courbes de lumière issues d'observations CCD faites entre mai et novembre 2005, date au-delà de laquelle Antiope devenait inobservable depuis la Terre. De par sa déclinaison fortement négative, ce sont principalement des observatoires de l'hémisphère sud qui ont été mis à contribution : Las Campanas au Chili, Itajuba au Brésil, SAAO en Afrique du Sud, l'observatoire des Makes à la Réunion mais également le Pic du Midi et l'observatoire Lick près de San Francisco (cf. Fig.2).

L'observation photométrique de phénomènes mutuels est une technique largement utilisée au sein des systèmes de satellites depuis déjà très longtemps. Au sein d'un système astéroïdal, elle permet d'avoir accès aux tailles et formes respectives de chacune des composantes. Ainsi, dans le cas d'un système double idéal, parfait, constitué de deux sphères identiques dont l'une occulte parfaitement l'autre à phase nulle, la chute en magnitude correspondante observée sera de :

$$\Delta mag = 2.5 \log(2) = 0.75$$

De même la taille des composantes pourra être déterminée à partir de la formule simple suivante:

$$R = a \sin(\pi \Delta T / 2P)$$

où R est le rayon d'une composante, a est le demi-grand axe de l'orbite, P la période de révolution orbitale et ΔT la durée du phénomène.

Cependant, ces formules, bien que simples d'application, n'en demeurent pas moins très limitées dans le cas de systèmes réels. Elles permettent toutefois de rapidement apprécier la nature du système en présence. En effet, si l'on constate dans les courbes de lumière observées que les amplitudes des chutes vont bien au-delà de 0.75mag et que celles-ci sont en outre inégales, on peut immédiatement en déduire que l'on est en présence de corps non sphériques ayant des tailles sensiblement différentes. D'autre part, elles ont l'avantage d'aider à comprendre à quoi les résultats issus des observations à haute résolution angulaire de positions relatives peuvent être

déterminant pour accéder à une caractérisation physique précise et complète du système.

Dans le cas d'Antiope, les courbes de lumières ont montré des amplitudes maximales des chutes en magnitude pouvant aller jusqu'à 0.90mag avec des profondeurs de chute inégales selon la composante qui est occultée/éclipsée. Ceci montre dans un premier temps que les corps constituant le système double d'Antiope sont de forme ellipsoïdale avec des tailles différentes. Afin de préciser ces résultats, il est nécessaire de modéliser de manière numérique les courbes de lumières produites par un système double en occultation mutuelle. Pour cela, nous avons développé un modèle complet de ces phénomènes intégrant les propriétés de diffusion de la lumière solaire par les surfaces (une simple loi de Minnaert a été utilisée avec une coefficient d'assombrissement de limbe de 0.5), les effets d'ombres projetées lors d'éclipses, mais également les paramètres liés à l'aspect général du système vu depuis la Terre. Pour ce dernier point, la solution de pôle procurée par les observations OA est précieuse car elle permet de fortement contraindre les autres paramètres du problème pour lesquels on ne dispose d'aucune information. Cependant ceci ne suffit pas et le système reste fortement sous-déterminé au regard des nombreuses inconnues du problème : forme des deux objets, tailles, ... Pour parvenir à nos fins, nous avons donc introduit une hypothèse supplémentaire, celle des ellipsoïdes de Roche.

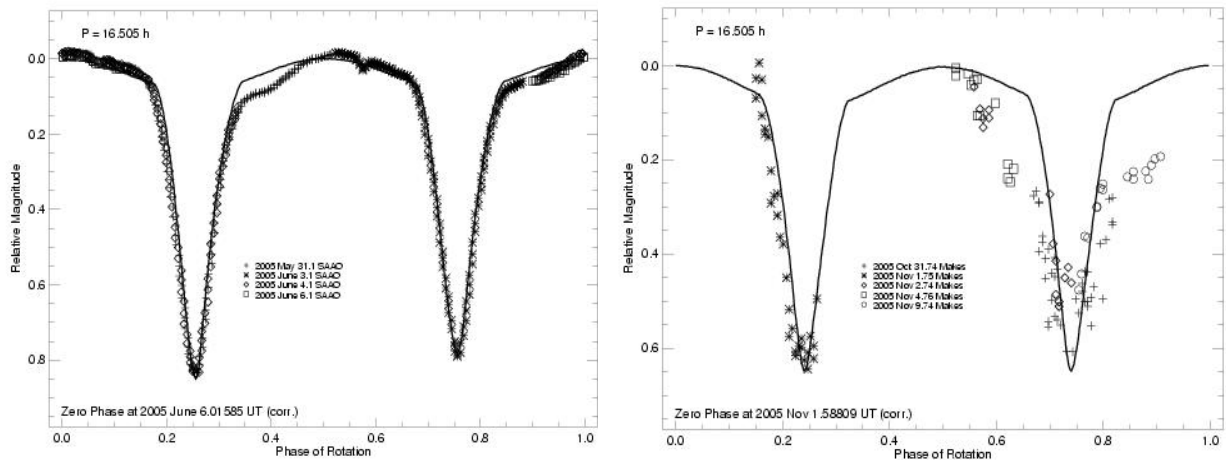


Fig.2 : Deux des courbes de lumières observées. La première montre une chute en magnitude supérieure à 0.8 magnitudes. La seconde, prise en fin de période de phénomènes et également de visibilité, montre une chute en magnitude beaucoup plus faible de ~0.6 magnitudes due à l'ouverture du plan orbital sur la ligne de visée.

4. L'hypothèse des ellipsoïdes de Roche et la résolution du système

Nous avons supposé que les figures prises par chacune des composantes du système double synchrone sont en définitive des figures de fluides en équilibre hydrostatique. Cette hypothèse peut a priori sembler saugrenue car il est difficile d'imaginer un astéroïde se déformant comme le ferait une masse fluide sous les effets de marée soulevés par l'autre masse fluide. Toutefois cette hypothèse est pratique car dans le cas de systèmes parfaitement synchronisés, elle impose une solution et une seule pour les formes et tailles des composantes à partir du moment où l'on se donne un rapport de taille, la densité interne, la séparation et la période de révolution orbitale.

On comprend ainsi que cette hypothèse fait peser des contraintes très fortes sur la solution d'ensemble du système puisque la quasi-totalité des paramètres libres du problème sont imposés par les résultats de l'analyse d'orbite. En d'autres termes, le seul paramètre libre restant du problème est le rapport de taille (Leone et al. 1984). Si l'on suppose par ailleurs que les propriétés de diffusion de la lumière solaires sont celles d'un corps sombre sans atmosphère, et que l'on se fixe la solution de pôle et donc l'aspect du système pour une date donnée, la détermination de la valeur du rapport de taille doit permettre de restituer l'ensemble des courbes de lumières observées. Si tel est le cas, nous pouvons à l'inverse valider sans réserves l'hypothèse initiale.

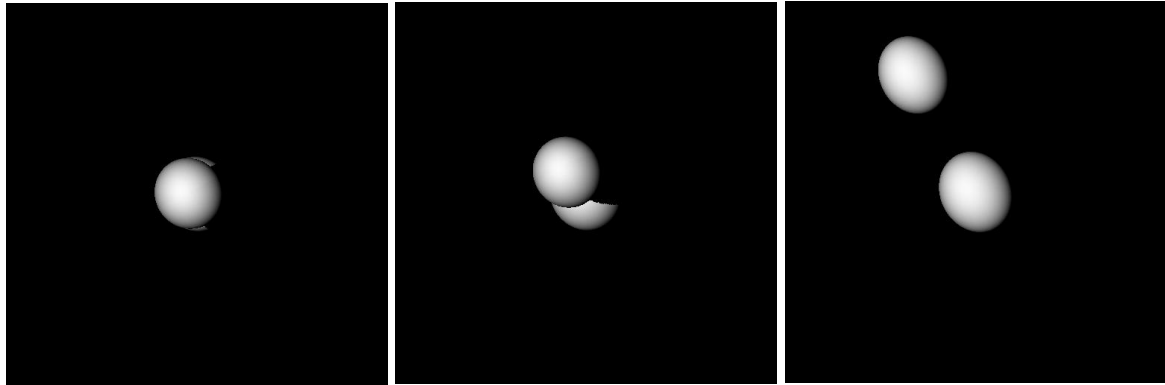


Fig.3 : Visualisation de la solution générale du système d'Antiope pour le 31 mai 2005, date de l'image obtenue en OA (cf. Fig.1). La phase était alors de l'ordre de 14 degrés et le plan orbital légèrement ouvert sur la ligne de visée. On notera le passage de l'ombre produite par l'une des composantes sur l'autre. On notera également leur forme légèrement ellipsoïdale.

En définitive, il a effectivement été possible de trouver une valeur unique de 0.954 pour le rapport de taille permettant de reproduire synthétiquement l'ensemble des courbes de lumières observées. Il est alors immédiat d'en déduire la solution ellipsoïdale de forme pour chacune des composantes (cf. Fig.3). Afin de valider la solution obtenue, nous avons également reproduit la forme des courbes de lumières correspondant à des dates d'observations photométriques antérieures réalisées entre 1996 et 2002. L'accord est excellent sauf dans le cas de phénomènes rasants pour lesquels l'observation peut s'éloigner au plus du modèle d'une valeur de 0.07magnitudes. Ceci provient du fait que les formes réelles ne sont pas rigoureusement ellipsoïdales mais qu'elles présentent de légers écarts qui ont pu être évalués à 1.4km au maximum. Ce résultat est également rassurant car il prouve que la structure interne de ces objets n'est bien évidemment pas fluide mais constituée d'un ensemble d'agrégats entre lesquels s'exercent une très faible friction non nulle.

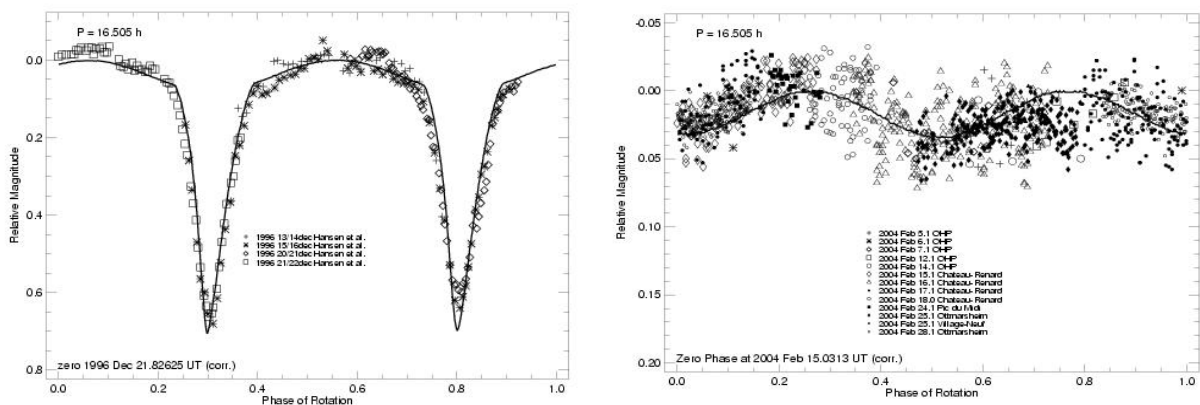


Fig.4 : Application de la solution à deux observations photométriques, celle de décembre 1996 alors que les objets étaient en période d'occultations mutuelles et en 2004, période pour laquelle le système est pratiquement vu par ses pôles.

5. Conclusion

De ce travail sur l'astéroïde double 90 Antiope, nous avons pu pour la première fois montrer de manière indubitable que les formes des deux objets en présence sont, au premier ordre, des figures de fluides en équilibre hydrostatique. Ce résultat permet de montrer que la friction interne de ces objets est beaucoup plus faible qu'on ne pouvait l'imaginer.

D'autre part, la résolution complète du problème à l'aide d'ellipsoïdes de Roche suppose implicitement une même densité et donc une même structure interne pour chacune des composantes. Il en va également de même en ce qui concerne les propriétés de rétrodiffusion du régolithe de surface. Ceci suggère par conséquent que ce système pourrait avoir comme origine un même corps parent qui aurait fissionné suite à une très forte augmentation de son moment cinétique. Cependant ce scénario comporte apparemment une difficulté. En effet si l'on calcule le moment cinétique global du système on trouve une valeur de 0.489 supérieure à la valeur de 0.39 qui est la limite d'instabilité dynamique des corps parfaitement fluides.

Il sera très intéressant dans de futurs travaux de rechercher parmi les nombreux systèmes doubles synchrones actuellement découverts si l'on peut à nouveau valider cette hypothèse des ellipsoïdes de Roche auquel cas il s'agira alors de s'attaquer à cette difficulté du moment cinétique. Beaucoup est donc à attendre de l'étude future de ces systèmes tant en termes de structure interne que d'origine et d'histoire collisionnelle.

Références

Leone, G., Farinella, P., Paolicchi, and V. Zappala. Equilibrium models of binary asteroids. 1984. *Astron. Astrophys.* **140**, 265-272.

Observations astrométriques de Pluton - Le problème du photocentre

R. Vieira Martins^{1,3}, A.H. Andrei^{1,2}, M. Assafin², P. Descamps³

¹Observatório Nacional - Rio de Janeiro, Brésil

²Observatório do Valongo/UFRJ - Rio de Janeiro - Brésil

³IMCCE - Paris - France

Introduction

Pluton a son satellite Charon avec une orbite qui arrive à s'éloigner à presque 1" de la planète. Comme la différence de magnitude des deux corps est de l'ordre de 2, alors ils ne sont pas résolus dans les images CCD du système faites sans optique adaptative. Par contre, la différence de magnitude est suffisamment petite et la séparation suffisamment grande pour que le photocentre de l'image arrive à s'éloigner de presque 0,1" du centre de la planète. Alors, pour avoir des positions de Pluton avec précision de l'ordre du dixième de seconde d'arc, il faut faire une correction du photocentre des images. Comme nous connaissons bien l'orbite de Charon par rapport à Pluton, cette correction peut être accomplie avec un modèle simple des images.

Dans ce travail nous présentons une expression simple pour la correction du photocentre et nous l'appliquons en 1541 images de Pluton.

1. Correction du photocentre

Nous considérons que l'image d'une étoile est bien modélisée par une gaussienne dont le sigma est le même pour toutes les étoiles du champ de l'image. Nous supposons que les images de Pluton et Charon peuvent être considérées comme ponctuelles. Alors, nous pouvons écrire, dans le plan qui contient le centre de Pluton et de Charon, l'addition des images par

$$f_{A+B}(x) = A \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) + B \exp\left(-\frac{(x-d)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

où **A** et **B** sont respectivement les hauteurs des gaussiennes de Pluton et Charon, et **d** est la distance entre les maxima des gaussiennes de Pluton et Charon;

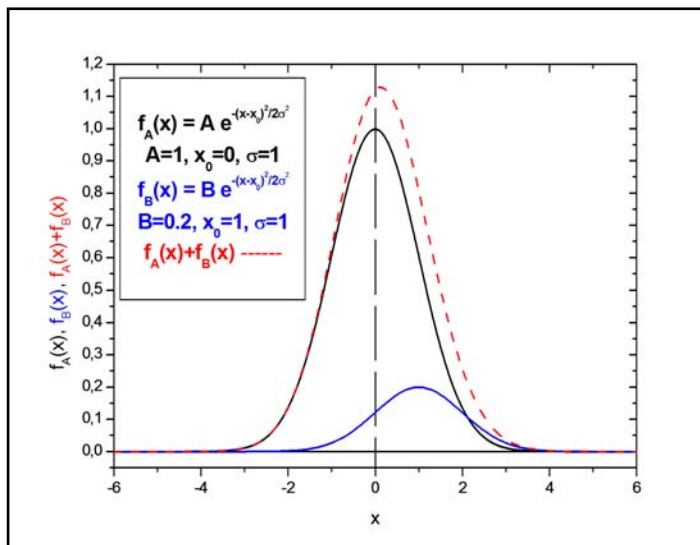


Figure 1. Les gaussiennes pour Charon (bleu), pour Pluton (noir) et pour la somme (rouge). Le maximum de la somme est décalé par rapport au maximum de Pluton et la largeur à la demi hauteur de la somme est plus grande que ces de Pluton et Charon

La Figure 1 donne les graphiques de deux gaussiennes et de sa somme. Nous observons dans cette figure que la somme de deux gaussiennes donne naissance à une courbe que ressemble à une

gaussienne de sigma plus grand que celui des étoiles. De plus, le maximum de cette courbe est décalé par rapport au centre de la gaussienne de Pluton. Ce maximum correspond au photocentre de l'image. Pour déterminer le décalage du photocentre il suffit de calculer la position de ce maximum par rapport au centre de Pluton.

La dérivée de cette fonction s'annule pour le maximum de f_{A+B} . On a alors

$$k(x_{dm} - 1) \exp\left[d_\sigma^2 \left(x_{dm} - \frac{1}{2}\right)\right] + x_{dm} = 0 \tag{2}$$

où $k = \frac{B}{A}$, $d_\sigma = \frac{d}{\sigma}$ et $x_{dm} = \frac{x_m}{d}$ c'est la valeur du maximum pour la fonction (1).

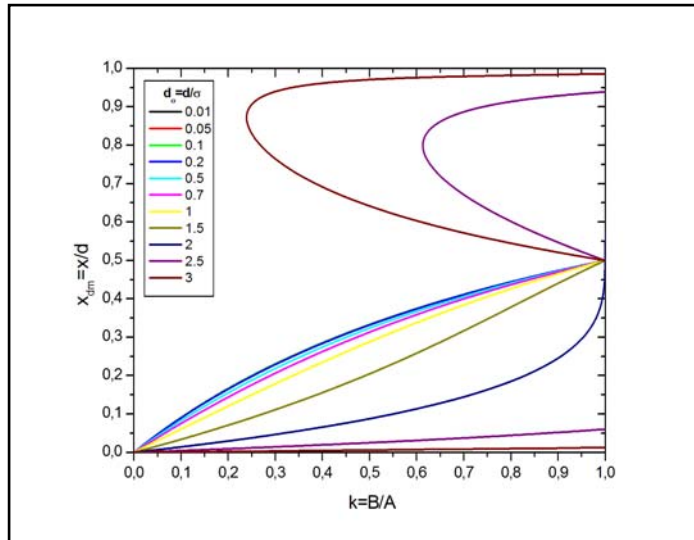


Figure 2. Solutions de (2) pour différents valeurs de f_{A+B} .

La Figure 2 présente les valeurs de x_{dm} par rapport à k . Nous pouvons observer que pour $k=0,16$, la valeur correspondant le mieux au système Pluton-Charon (Reinsch et al. 1994, Null et al. 1996, Dumas et al. 2001) est de l'ordre de $0,1$. Alors, si nous développons cette expression en série de Taylor dans la voisinage de $x_{dm}=0$ jusqu'à l'ordre 1, on obtient pour x_{dm} :

$$x_{dm0} = \frac{k}{\exp\left(\frac{d_\sigma^2}{2}\right) - k(d_\sigma^2 - 1)} \tag{3}$$

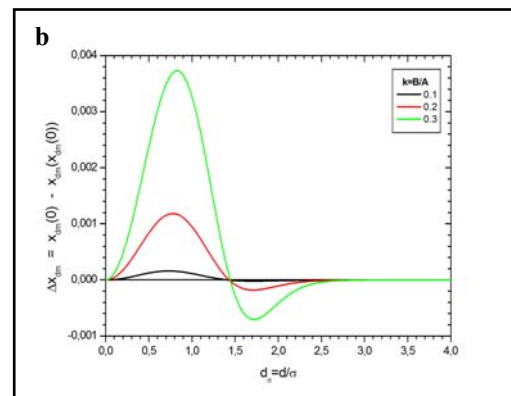
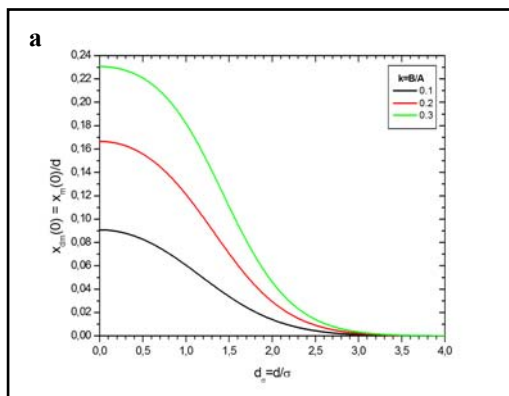


Figure 3. (a) Quelques solutions de (3) pour des petites valeurs de k .
(b) Différence entre les solution (3) et ces d'ordre supérieur.

La Figure 3a montre ces solutions par rapport à d_σ pour trois valeurs de k proches de celui du système Pluton-Charon. Nous avons calculé une autre solution de l'équation (2) obtenue d'après

l'application de la méthode décrite ci-dessus mais avec le développement de Taylor au voisinage de la solution donné en (3). La différence entre cette nouvelle solution et la solution (3) est donnée par la Figure 3b. Nous pouvons observer que l'écart entre les deux solutions est de quelques centièmes par rapport à la solution (3). Nous pouvons donc utiliser la solution (3) comme expression valable pour opérer la correction de photocentre.

Pour appliquer la correction du photocentre il faut connaître le σ des gaussienne des étoiles qui est égal à **0,425** fois la largeur à la demi-hauteur, c'est à dire, le "seeing" de l'image, et aussi la position de Charon par rapport à Pluton, et le rapport entre les flux de Charon et Pluton.

Pour les observations astronomiques, le "seeing" est donné par les logiciels de réduction des images et les positions de Charon par rapport à Pluton sont données par les éphémérides de Charon. Par contre, les rapports entre les flux de Charon et Pluton sont plus difficiles de déterminer parce qu'ils dépendent de la partie de la surface de Pluton et Charon que nous observons. Comme l'albédo de Pluton varie, et la correction du photocentre a un rapport presque linéaire avec k (voir Figure 2), cette variation peut être importante.

2. Observations de Pluton

Nous avons observé Pluton à partir de 2001 avec le télescope Ritchey-Chretien de 60 cm d'ouverture du LNA-Itajuba-Brésil (IAU code 874) et 1541 images étaient obtenues. Le détecteur utilisé c'était un CCD de 1048x1048 pixels, l'échelle était de 32"/mm et le champ avait 10'x10'. Aucun filtre n'était utilisé.

Nous avons fait tous les réductions avec un logiciel développé par M. Assafin en 2006. Le catalogue de référence était le UCAC2 et le décalage local de l'UCAC par rapport à l'ICRF avait été déterminé à partir des observations astrométriques de quasars de l'ICRS (Assafin et al. 2001, Assafin et al. 2005). Nous avons pris les positions théoriques de Pluton et Charon des éphémérides du JPL, donné dans *Horizon*.

3. Les signatures de Charon

Comme la Figure 1 le montre, la largeur à la demi-hauteur de l'image (FWHM en anglais) de Pluton+Charon, est plus grande que les FWHM des images des étoiles de la même image. Alors nous avons comparé, pour chaque image, la FWHM moyenne des étoiles avec le FWHM de l'image du système de Pluton. Nous pouvons voir dans la Figure 4 que cette grandeur est nettement plus grande pour l'image de la planète, ce que montre la contribution de Charon dans l'image.

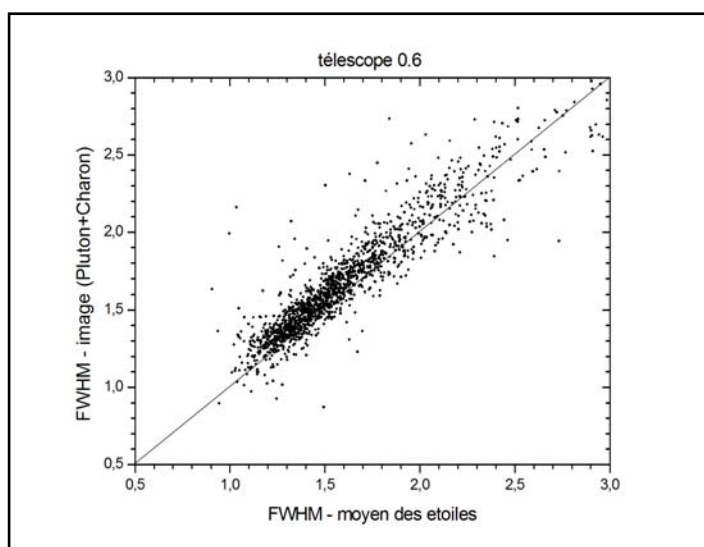


Figure 4. Comparaison entre la largeur à la demi hauteur pour chaque image de Pluton-Charon et la moyenne pour les étoiles du champ correspondant.

La Figure 5 présente les résidus obtenus. Nous pouvons observer que la signature de Charon est remarquable.

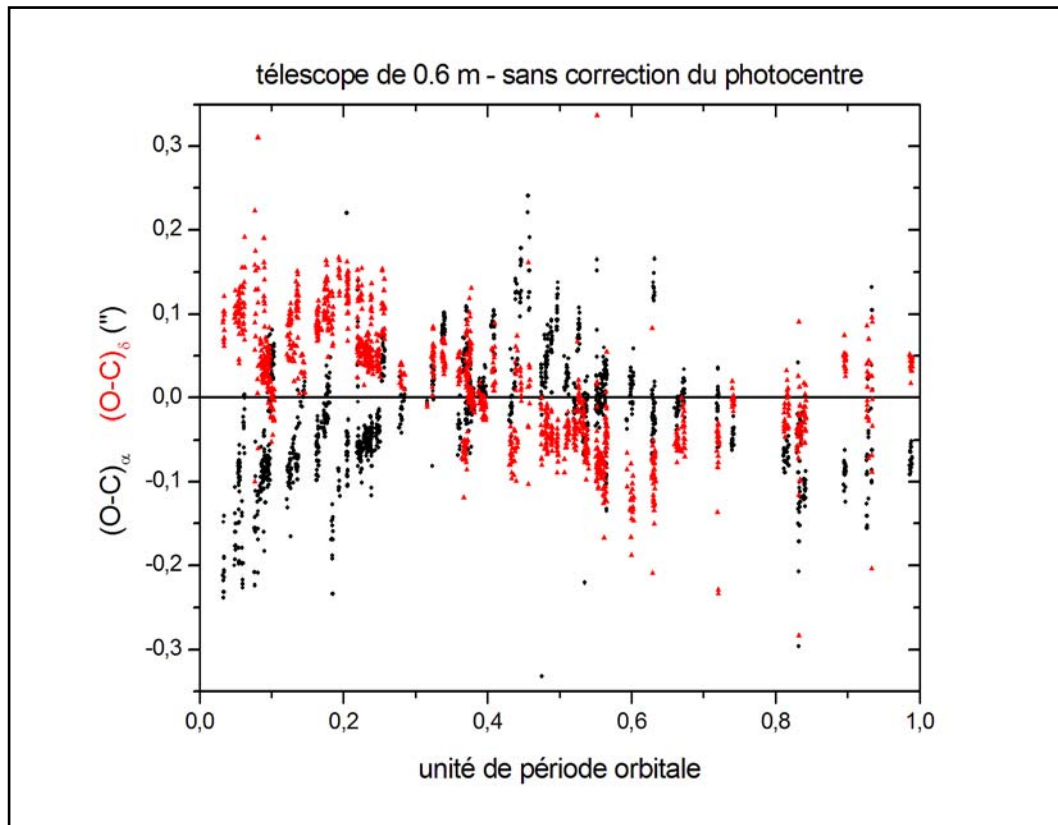


Figure 5. Les résidus pour les O-C de Pluton avant la correction du photocentre.

Après, nous appliquons la correction donnée par la relation (3), où \mathbf{d}_σ est donné par les positions x et y de Charon par rapport à Pluton (voir Figure 6a), le sigma est calculé à partir du FWHM moyen des étoiles et le $k=0,16$. La courbe de correction est donnée dans la Figure 6b. Alors, la signature de Charon disparaît (voir Figure 7). Nous pouvons observer aussi ce résultat par la diminution des écarts des (O-C) dans la Table 1.

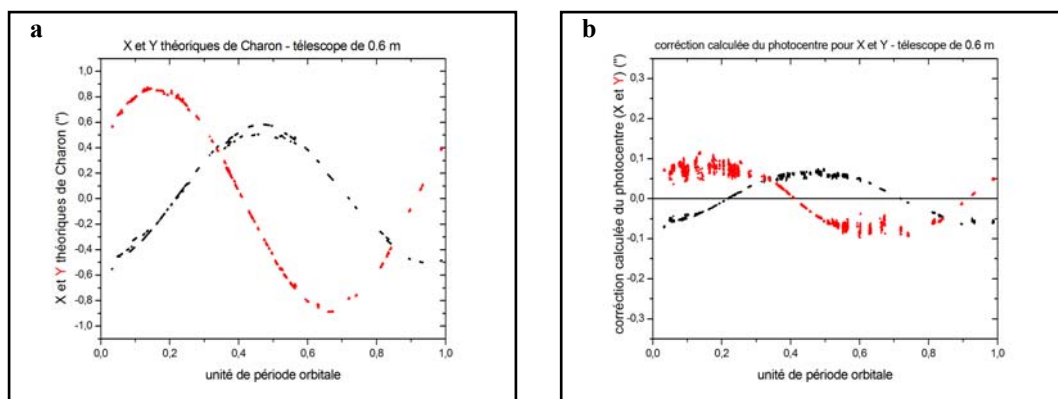


Figure 6. (a) x et y de Charon par rapport à Pluton pour les dates observations.
 (b) Corrections données par la relation (3) pour les mêmes observations.

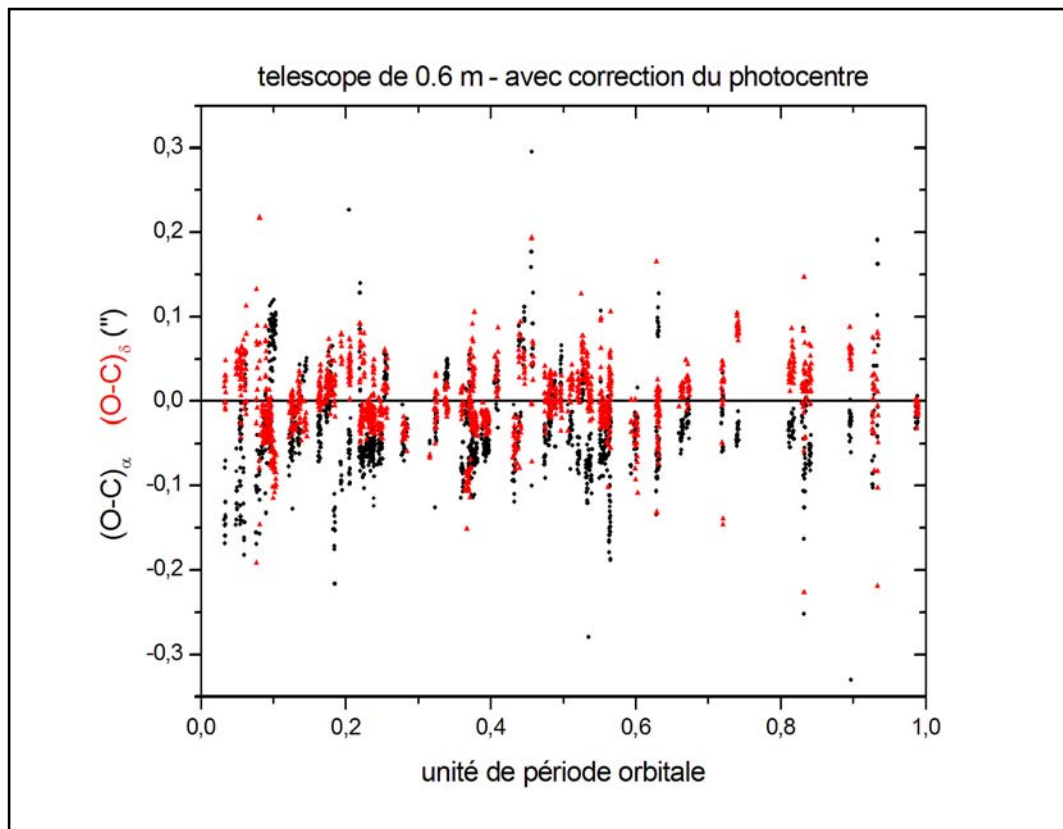


Figure 7. Les résidues, pour les O-C de Pluton, après la correction du photocentre.

Table 1 – Statistic pour les observations de Pluton

	moyenne	écart type	erreur	numéro
sans la correction du photocentre				
(O-C) α	-0,008	0,075	0,002	1541
(O-C) δ	0,020	0,071	0,002	1541
avec la correction du photocentre				
(O-C) α	-0,020	0,060	0,002	1541
(O-C) δ	0,009	0,042	0,001	1541

4. Commentaires

Il y a plusieurs continuations naturelles de ce travail.

Premièrement nous pouvons améliorer la correction du photocentre si nous considérons les variations du paramètre k dus aux variations de l'albédo sur la surface de Pluton.

Comme la correction du photocentre peut avoir des valeurs qui arrivent jusqu'au dixième de seconde d'arc, il est important d'essayer de faire cette correction pour toutes les observations de Pluton utilisées dans l'obtention des éphémérides de la planète.

Les résultats obtenus pour le système Pluton-Charon suggèrent qu'on puisse utiliser la méthode de la correction du photocentre dans le sens inverse, c'est à dire, pour détecter des systèmes doubles par la variation de la largeur à la demi-hauteur de l'image et des oscillations du photocentre.

Références

Assafin M., Andrei A.H., Vieira Martins R., Silva Neto D.N., de Camargo J.I.B., Teixeira R., Benevides-Soares P.: 2001, "Investigation of USNO-A2.0 Catalogue Positions", *Astroph. J.*, 552, 380-385.

Assafin M., Monken Gomes P.T., da Silva Neto D.N., Andrei A.H., Vieira Martins, R., Camargo J.I.B., Teixeira R., Benevides-Soares: 2005, "Astrometry of ICRF sources using the UCAC2 catalog" *Astron. J.* 129, 2907-2913.

Dumas C., Terrile J.T., Brown R.H., Schneider G., Smith A.S. : 2001, "Hubble Space Telescope spectroscopy of Charon's leading and trailing hemisphere", *Astron.J.* 121, 1163-1170.

Null G.W., Owen Jr. W.M.: 1996, "Charon/Pluto mass ratio obtained with HST CCD observations in 1991 and 1993", *Astron.J.*, **111**, 1368-1381.

Reinsch K., Burwitz V., Festou M.C., 1994: "Albedo and Maps of Pluto and Improved Physical Parameters of the Pluto-Charon System", *Icarus* 108, 209-218.

Évolutions de TRIP

Mickaël Gastineau, Jacques Laskar

1. Introduction

Les calculs en Mécanique Céleste, en particulier celui des perturbations, imposent l'emploi d'expressions analytiques très volumineuses. Le développement d'un logiciel de calcul formel, nommé TRIP, destiné à ces calculs a été entrepris depuis le début des années 90 (Laskar, 1990) car les logiciels mathématiques courants, tels Mathematica ou Maple, ont tendance à devenir inefficace lors de manipulations de séries de plusieurs centaines milliers de termes.

La représentation en mémoire des objets manipulés influence directement les performances en terme de temps d'exécution et d'occupation mémoire. Depuis le début de la conception de TRIP, celui-ci possède plusieurs représentations de séries que l'utilisateur choisit selon la nature des séries rencontrées dans le problème étudié. Il possède, notamment, deux représentations récursives creuse et pleine (Laskar, 1990). L'arrivée de processeurs, ayant plusieurs niveaux caches, pénalisent l'utilisation de ce type de représentation. En effet, le temps de latence pour accéder à la mémoire principale est au moins dix fois supérieur au temps de latence pour accéder au cache. Les indirections dans les représentations récursives provoquent un accès plus fréquent à la mémoire principale et imposent donc une attente du processeur. Une nouvelle représentation non récursive tenant compte des accès au cache et à la mémoire a été conçue.

L'introduction de plusieurs processeurs ou coeurs dans les ordinateurs actuels offrent la possibilité d'effectuer des calculs en parallèle sur ces unités de traitements. Les opérations de multiplication de séries occupent une partie importante du temps d'exécution de nos calculs, celle-ci a donc été parallélisée pour les ordinateurs SMP (symmetric multiprocessing).

2. Nouvelle représentation de séries

Les processeurs modernes disposent de plusieurs niveaux de cache pour réduire le temps d'accès aux données en mémoire. Ils chargent des morceaux contigus de mémoire dans ces caches. De plus, les processeurs peuvent charger par anticipation (technique de prefetching) ces blocs de données pour réduire l'attente du processeur. La nouvelle représentation des séries, dénommée *vecteur plat* (figure 1), doit donc stocker les données sous forme de vecteurs (tableaux) et ne doit pas être récursive, pour bénéficier au maximum des effets du cache. Au lieu d'utiliser un seul vecteur pour les coefficients et les exposants de l'ensemble des termes de la série, les coefficients et les exposants sont stockés dans des vecteurs séparés afin que les opérations élémentaires (addition, multiplication, ...) sur les exposants et les coefficients de taille fixe utilisent les unités de traitement SIMD (instructions SSE ou AltiVec pour les processeurs Pentium et PowerPC). Les exposants et les coefficients sont stockés dans de petits vecteurs afin de diminuer le nombre de comparaisons lors de l'addition de deux séries et de bénéficier d'un effet de cache lors de la multiplication de séries. Pour diminuer l'empreinte mémoire des exposants, ceux-ci sont compressés en utilisant des opérations de décalage et de masque de bits. Les temps de compression et décompression des exposants sont négligeables et le facteur de compression est bon car les variables les plus factorisées sont stockées en général sur très peu de bits.

La multiplication de deux séries représentées sous la forme de *vecteur plat* utilise une structure temporaire nommée *burst tries* (Gastineau, Laskar, 2006). Cette structure est un arbre n-aire dont les feuilles sont des conteneurs qui se transforment en arbre n-aire lorsque leur nombre d'éléments atteint un seuil fixé. A la fin de la multiplication, un simple parcours de cet arbre permet de reconstruire le *vecteur plat*. Le gain en temps d'exécution lors de la multiplication de deux séries est d'environ 60% par rapport à une représentation récursive pleine.

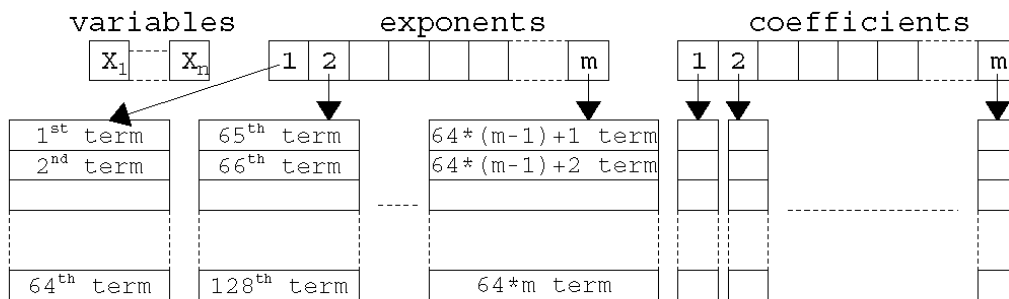


Figure 1: Représentation d'un *vecteur plat*

3. Parallélisation de la multiplication de séries

La présence de plus en plus fréquente d'ordinateurs SMP, dont les unités de traitement accèdent de manière uniforme à la mémoire, permet de bénéficier d'un traitement parallèle. Les traitements peuvent être paralléliser en utilisant différentes API dont OpenMP et POSIX Pthreads. Ces deux API utilisent des threads (fils d'exécution) qui s'exécutent en parallèle sur chacune des unités de traitements. La communication entre ces threads ne nécessitent pas de recopie de données à la différence des APIs du type MPI. De plus, comme l'accès à la mémoire est uniforme, il n'est pas nécessaire de tenir compte de la localisation des données pour distribuer le travail entre les threads. A l'aide de l'API POSIX Pthreads, un modèle maître-esclave a été retenu pour répartir les traitements entre les threads.

L'opération de multiplication de séries a été parallélisée sur ce type d'architecture en utilisant l'API POSIX Pthreads car la multiplication de deux séries est une opération très coûteuse et fréquemment utilisée dans nos calculs. Le produit de séries représentées sous la forme récursive pleine est très facilement parallélisable du fait de la récursivité des structures. Par contre, le produit de séries sous la forme de *vecteur plat* est plus difficilement parallélisable à cause de la construction de la structure temporaire *burst tries*. En effet, un accès concomittant à cette structure par plusieurs threads imposerait la présence de verrou, donc de goulet d'étranglement en terme de temps d'exécution. Il a été choisi que chaque thread construirait une structure temporaire *burst tries* et qu'une étape finale parallélisée consisterait à fusionner tous ces *burst tries* pour obtenir le résultat afin d'éviter la présence de verrous.

La construction de structures récursives, tant pour la multiplication sous forme récursive creuse ou pour les *burst tries*, nécessite un grand nombre d'allocations mémoire. La figure 2 montre que l'allocation simultanée de zone mémoire par plusieurs threads depuis un unique tas est très inefface. Pour chaque représentation de séries, le gestionnaire de mémoire a été modifié pour que chaque thread alloue la mémoire depuis son propre tas. L'utilisation de gestionnaire de mémoire spécifique pour les allocations mémoire de petite taille (moins de 100 octets) assure un gain en temps d'exécution d'environ 27% et réduit l'occupation mémoire de 25%. La figure 3 montre un speedup linéaire pour la multiplication de deux séries tant pour la représentation récursive pleine que pour celle en *vecteur plat*. L'augmentation des performances de cette dernière n'est pas aussi bonne que la représentation récursive pleine car l'étape finale de fusion des *burst tries* est un goulet d'étranglement dans la parallélisation si le nombre de processeurs devient élevé.

4. Comparaisons avec d'autres systèmes de calculs formels

Des précédents benchmarks (Fateman, 2003) ont montré que les logiciels PARI-GP (PARI Group, 2004) et Singular (Greuel et al, 2005) étaient parmi les plus efficaces pour la multiplication de polynômes creux. Afin d'obtenir des comparaisons objectives, la librairie GMP 4.1.4 (Granlund, 2004) a été utilisée dans tous les logiciels pour l'arithmétique sur les coefficients numériques car les temps d'exécution dépendent fortement de cette arithmétique. En effet, le tableau montre la différence de temps d'exécution

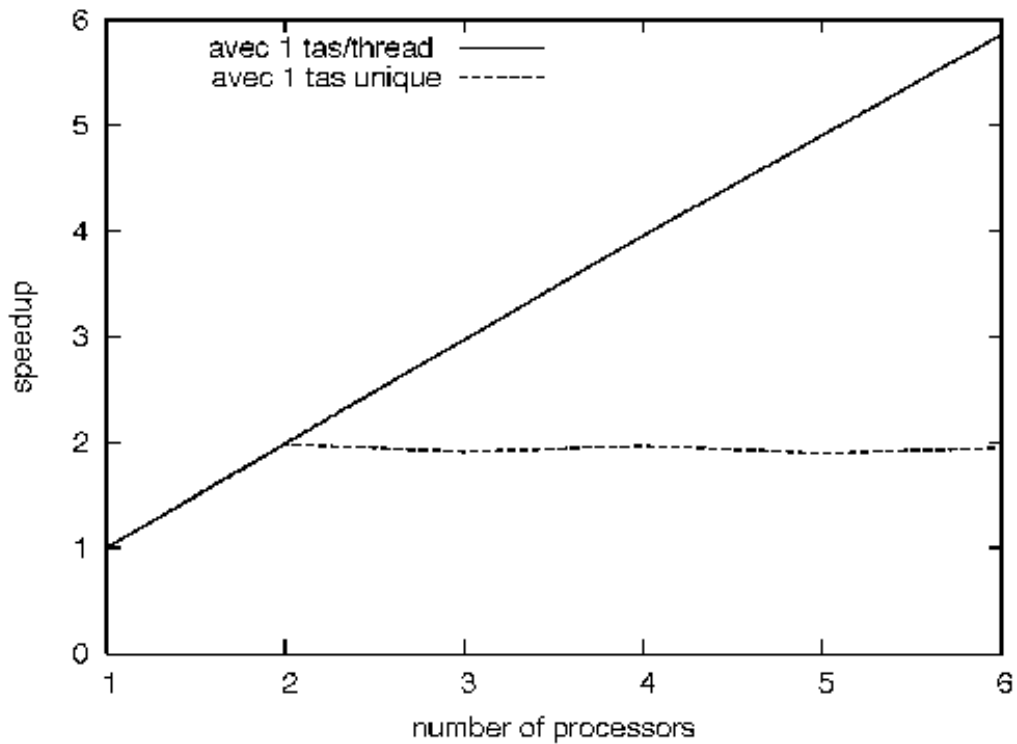


Figure 2: Impact des allocations mémoire depuis un tas unique ou depuis un tas par thread sur la multiplication de séries

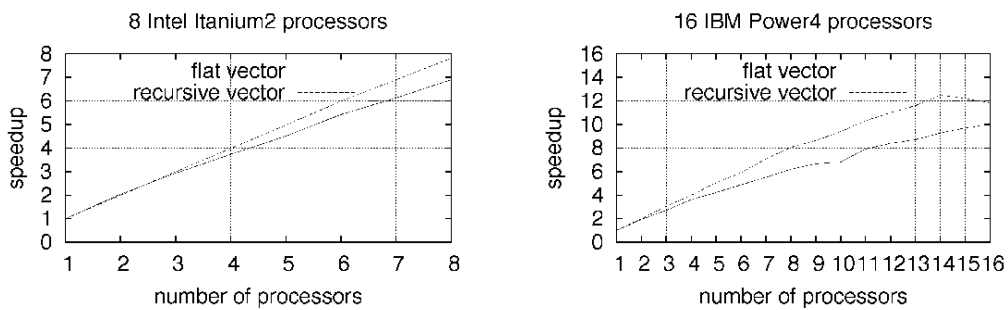


Figure 3: Speedup du calcul de $(1 + x + 3y + 5z + 7t)^{23} \times (1 + 11x + 13y + 17z + 23t)^{23}$ suivant différentes représentations de séries. Les calculs ont été réalisés sur un serveur équipé de 8 processeurs Intel Itanium2 (1.5GHz avec un bus système à 400 MHz) sous OS Linux 2.6, et un autre serveur équipé de 16 processeurs IBM Power4 sous AIX 5.2.

Systèmes de calcul formels	$s_1 \times (s_1 + 1)$		$s_2 \times (s_2 + 1)$	
	time (s)	memory (Kb)	time (s)	memory (Kb)
PARI/GP 2.1.7	82.1	N/A	225.6	N/A
PARI/GP 2.3.0 (GMP)	67.6	N/A	174.4	N/A
Singular 3.0.1	101.5	8383.5	42.8	982.9
TRIP 0.98 (liste récursive)	54.6	7138.5	15.5	1370.0
TRIP 0.98 (vecteur récursif)	42.9	5953.7	16.5	1831.4
TRIP 0.98 (vecteur plat)	24.1	3609.1	13.3	721.2

Table 1: Temps d'exécution (en secondes) et espace mémoire occupé (kilooctets) pour la multiplication de deux séries avec différents systèmes de calcul formels. $s_1 = (1 + x + y + z + t)^{20}$ et $s_2 = (1/3 \times x + 3/5 \times y + 5/7 \times z + 7/11 \times t)^{20}$. Les calculs ont été réalisés sur un processeur Intel Xeon 3.06Ghz avec un bus système de 533Mhz sous Linux 2.6

entre les version 2.1.7 et 2.3.0 de PARI/GP : la version 2.1.7 utilise sa propre bibliothèque de fonctions arithmétiques alors que la version 2.3.0 utilise GMP. De plus, le parallélisme dans TRIP a été désactivé car les autres logiciels de calcul formel ne disposent pas actuellement d'une telle fonctionnalité.

Les représentations de polynômes, notamment celle en *vecteur plat* dans TRIP sont très efficaces en temps d'exécution comparés à Singular et PARI/GP. Les représentations récursives occupent dans certains cas plus de mémoire que Singular car les séries (par exemple $s_2 \times (s_2 + 1)$) peuvent être très creuses. Bien que l'algorithme de compression soit très simple (décalage et masque de bits), l'empreinte mémoire de la représentation en *vecteur plat* est bien inférieure à celle de Singular et aux autres représentations récursives de TRIP.

Références

- [1] Laskar, J.: 1990, Manipulation des séries, in D. Benest, C. Froeschlé (eds.). *Les méthodes modernes de la Mécanique Céleste* (Goutelas 1989).
- [2] Gastineau, M., Laskar, J. : 2006, Development of TRIP: Fast Sparse Multivariate Polynomial Multiplication Using Burst Tries. *proceedings de 6th International Conference on Computational Science (Reading, UK), Lecture Notes in Computer Science, vol. 3992, Springer, p. 446-453*.
- [3] Fateman, R. : 2003, Comparing the speed of programs for sparse polynomial multiplication. *SIGSAM Bulletin,, vol. 37, ACM Press, p. 4-15*.
- [4] PARI Group : 2004, PARI/GP, version 2.1.5. *The PARI Group, Bordeaux, <http://pari.math.u-bordeaux.fr/>*.
- [5] Greuel, G.-M., et al : 2005, SINGULAR 3.0, A Computer Algebra System for Polynomial Computations . *Centre for Computer Algebra, University of Kaiserslautern, <http://www.singular.uni-kl.de>*.
- [6] Granlund, T., : 2004, GNU Multiple Precision Arithmetic Library 4.1.4 . <http://swox.com/gmp/>.

Informations sur l'hygiène et la sécurité

Luc Touchet

Introduction

L'Observatoire de Paris et l'IMCCE ont mis en place une organisation destinée à améliorer les conditions d'hygiène et de sécurité. Les grandes lignes vont en être présentées. Seront ensuite abordées deux situations d'urgence.

1. L'organisation hygiène et sécurité de l'Observatoire de Paris et l'IMCCE

1. 1. L'organisation hygiène et sécurité de l'Observatoire de Paris

L'Observatoire de Paris a mis en place une organisation comprenant différents éléments :

Un comité hygiène et sécurité :

C'est un comité qui se réunit semestriellement sous la présidence de Daniel Egret. Son rôle est d'analyser les risques professionnels auxquels les agents sont exposés, d'enquêter sur chaque accident ou maladie professionnelle, de proposer des mesures d'amélioration de l'hygiène et la sécurité dans les lieux de travail, de faire assurer les prescriptions de sécurité et de donner son avis sur les projets d'aménagement, de construction, d'entretien des locaux au regard des impératifs de sécurité.

Deux ingénieurs :

Deux ingénieurs chargés de l'hygiène et de la sécurité exercent un rôle de conseil auprès des instances dirigeantes de l'Observatoire et des directions des laboratoires : un ingénieur hygiène et sécurité pour l'Observatoire de Paris, Yann Auger, membre du comité hygiène et sécurité, et un ingénieur prévention sécurité pour le CNRS, Janine Wybier, invitée permanente du comité hygiène et sécurité.

Deux médecins :

Deux médecins de prévention - membres de droit du comité hygiène et sécurité - exercent leur activité au sein de l'Observatoire : le docteur Hoang pour l'Observatoire de Paris et le docteur Chereau pour le CNRS.

Des inspections :

Des inspections sont menées par l'inspection générale de l'administration de l'éducation nationale et de la recherche. La dernière inspection a eu lieu en octobre 2004, un rapport a été transmis en janvier 2005.

Deux registres :

- un registre hygiène et sécurité pour consigner des remarques, suggestions ou problèmes liés à l'hygiène et la sécurité,
- un registre spécial pour signaler les dangers graves et imminents, c'est à dire les dangers susceptibles de provoquer la mort, la maladie ou une incapacité dans un avenir très proche voire immédiat.

Un projet de tri sélectif :

Il s'agit d'organiser un tri sélectif pour les matières recyclables, à savoir : papiers, cartons, bouteilles plastiques et cannettes. Il y aurait donc une corbeille réservée aux matières recyclables en plus de la corbeille habituelle qui serait alors réservée aux matières non recyclables. Un ramassage alterné serait effectué par les agents chargés du ménage et la mise en oeuvre pourrait se faire prochainement.

1. 2. L'organisation hygiène et sécurité de l'IMCCE

De son côté, l'IMCCE s'est doté d'une organisation comprenant :

Une commission hygiène et sécurité :

Cette commission a pour rôle de proposer les règles à suivre pour l'utilisation des matériels et de veiller au bon aménagement des locaux. Elle travaille en relation étroite avec le comité hygiène et sécurité de l'Observatoire.

Des sauveteurs secouristes du travail :

Quatre sauveteurs secouristes du travail peuvent intervenir en cas de besoin (accident, malaise ...) : Thérèse Derouazi, Maryse Martinez, Christian Ruatti et Luc Touchet.

Des guides d'évacuation :

Quatre volontaires bénévoles guides d'évacuation ont un rôle de vérification et d'information lors de l'évacuation du bâtiment : Maryse Martinez, Philippe Duhamel, Christian Ruatti et Luc Touchet.

Un agent chargé de la mise en œuvre des règles d'hygiène et sécurité et un agent adjoint :

Ils exercent un rôle de conseil et d'assistance auprès de la direction : Luc Touchet et Maryse Martinez.

Un document d'évaluation des risques :

Un document d'évaluation des risques professionnels, le « document unique », identifie et classe les risques dans chaque unité de travail. Un document unique a été constitué en 2003 à l'IMCCE, sa mise à jour est prévue en 2006.

Une armoire à pharmacie :

Une armoire à pharmacie est installée au 2ème étage. Pour son accès, vous pouvez vous adresser à William Thuillot, Maryse Martinez, Isabelle Nicolas, Philippe Duhamel ou Luc Touchet. Une clé supplémentaire est stockée dans le coffre.

2. Les situations d'urgence

2. 1. L'appel des secours :

Une procédure d'appel des secours a été mise en place au niveau de l'Observatoire de Paris :

- la personne qui souhaite prévenir les secours compose le n° 18 en interne, ce numéro permet de joindre le poste de garde du 77 av Denfert-Rochereau,
- le gardien appelle les secours.

Pourquoi ne pas appeler directement les secours ?

C'est une question d'efficacité : en général les secours arrivent vite à l'accueil de l'Observatoire mais perdent du temps à localiser l'endroit de l'accident. Le gardien, prévenu du lieu de l'accident, pourra efficacement orienter les secours dans les bâtiments.

Un numéro d'urgence complémentaire :

Il s'agit de composer le 112 pour appeler les services de secours en interconnexion (0+112 depuis un poste fixe). Ce numéro fonctionne partout en Europe ainsi que sur tous les portables même sans code d'accès.

2. 2. L'évacuation du bâtiment A

Le signal de l'évacuation du bâtiment est donné par l'alarme. Il n'y a qu'un seul type de signal d'alarme et ce signal correspond toujours à l'évacuation du bâtiment.

Des exercices programmés :

Trois exercices d'évacuation du bâtiment A vont avoir lieu :

- 1er exercice : dans les prochaines semaines, tout le monde sera prévenu,

- 2ème exercice : à l'automne, les guides d'évacuation seront prévenus,
- 3ème exercice : à une date ultérieure choisie par l'ingénieur hygiène et sécurité.

Quelques informations sur ce qu'il convient de faire lorsque l'on entend l'alarme :

- arrêter son travail,
- fermer la fenêtre de son bureau,
- fermer la porte de son bureau en sortant (mais pas à clé),
- sortir du bâtiment par l'escalier principal,
- se rassembler devant le kiosque Chateaubriand (en face de la cantine).

Deux éléments sont particulièrement importants du point de vue de la sécurité lors de l'évacuation d'un bâtiment :

- ne pas prendre l'ascenseur pendant une évacuation,
- ne pas remonter dans le bâtiment un fois l'évacuation commencée.

L'escalier de secours :

Il doit être prolongé jusqu'au rez-de-chaussée sur le budget 2007 (information de Yann Auger). Il va s'agir de réaliser la partie manquante dans le prolongement de la partie existante sans passer par l'extérieur du bâtiment.

Conclusion

Un appel aux volontaires est lancé tant pour les guides d'évacuation - il en faudrait idéalement deux par étage – que pour les secouristes du travail. La formation des secouristes du travail s'effectue sur trois jours lors de la première année puis sur un jour les années suivantes.

L. Duriez

Introduction

On propose de montrer comment l'Analyse en Fréquence permet de représenter avec précision une intégration numérique sur une longue durée, dans le cas où les mouvements à représenter sont quasi-périodiques du temps. Pour l'application aux satellites galiléens de Jupiter, on atteint une précision de la représentation de l'ordre du kilomètre sur plusieurs milliers d'années et inférieure au kilomètre sur quelques siècles.

1 - Théorie synthétique

Une théorie synthétique est une représentation quasi-périodique d'un mouvement, construite à partir d'une intégration numérique de ce mouvement en utilisant l'analyse en fréquence (méthode de J. Laskar, suffisamment connue pour ne pas la rappeler ici). La durée D de l'intégration doit être assez longue pour couvrir plusieurs périodes des plus longues périodes présentes dans le système dynamique (supérieures à 600 ans pour les galiléens). Cette durée entraîne un pouvoir de résolution de l'analyse caractérisé par une fréquence fondamentale $\omega_f = \pi/D$ correspondant à une période maximum $T_{max} = D/2$. Suivant la fonction de Hanning utilisée dans l'analyse, on arrive à séparer des fréquences si elles sont distantes de 2 ou 3 ω_f . L'analyse en fréquences des séries temporelles générées par l'intégration numérique se fait nécessairement sur une discrétisation avec un pas Δt , et donc un nombre de points $2n$ tel que $D = 2n \Delta t$. Cet échantillonnage implique que les plus hautes fréquences analysables directement sont inférieures à la fréquence de Nyquist $\omega_{max} = \pi/\Delta t$ correspondant à une période minimum $T_{min} = 2\Delta t$. Donc il faut en principe utiliser un pas Δt très petit si on veut atteindre les termes à très courtes périodes du système. Si le pas Δt est trop grand, des termes à trop courte période peuvent ne pas être analysables directement, et on les élimine généralement par un filtre passe-bas, comme en [1], sinon elles apparaissent comme des fréquences fantômes (ou "alias") à l'intérieur de la "fenêtre d'analyse" : $[-\omega_{max}, +\omega_{max}]$. Une haute fréquence ω située à l'extérieur de cet intervalle est vue et analysée dans cet intervalle à la fréquence ω' telle que l'on ait $\omega = \omega' + 2k\omega_{max}$, mais on ne connaît pas a priori la valeur de l'entier $2k$.

Cependant, par la méthode de J. Laskar [2], on peut déterminer l'entier $2k$ en utilisant 2 analyses en fréquences correspondant à 2 pas Δt_1 et Δt_2 très voisins, correspondant à deux fréquences de Nyquist ω_{max_1} et ω_{max_2} ; une fréquence ω est "vue" à la fréquence ω_1 par la première analyse et la fréquence ω_2 par la deuxième et on a:

$$\omega = \omega_1 + 2k\omega_{max_1} \quad \text{et} \quad \omega = \omega_2 + 2k\omega_{max_2}$$

avec

$$2k = \left[\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2 - \Delta t_1} ((\omega_2 - \omega_1)\Delta t_2 - [\omega_1\Delta t_1 - \omega_2\Delta t_2]) \right] \quad (1)$$

où $[x]$ est l'entier tel que $-\frac{1}{2} < x - [x] \leq \frac{1}{2}$

Donc en utilisant cette méthode de double analyse, on n'est plus obligé de filtrer les hautes fréquences et on peut analyser toutes les fréquences (qu'elles soient basses ou hautes) avec le même pouvoir séparateur, donc la même finesse de résolution. En outre, il n'y a plus aucune limite pour la détermination des hautes fréquences.

Ainsi, pour le système dynamique des satellites galiléens de Jupiter, on a adopté les valeurs suivantes :

$$\begin{aligned} \Delta t_1 &= 7.5 \text{ j} & \Delta t_2 &= 7.500000075 \text{ j} = \Delta t_1(1 + 10^{-8}) \\ 2n &= 245760 & & \Rightarrow D \approx 5046 \text{ ans} \\ \omega_f &= 3.4088 \cdot 10^{-6} \text{ rad/j} & & \Rightarrow T_{max} \approx 2523 \text{ ans} \\ \omega_{max} &= 0.418879 \text{ rad/j} & & \Rightarrow T_{min} = 15 \text{ j} \end{aligned}$$

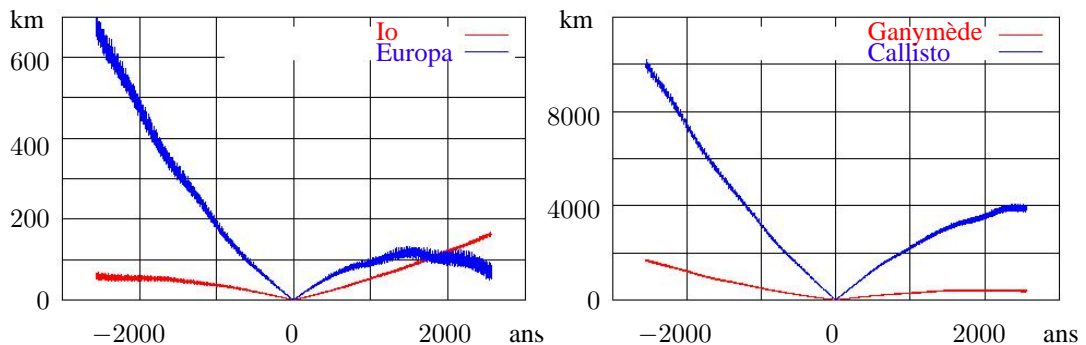
La très faible différence entre Δt_1 et Δt_2 permet d'avoir les fréquences ω_1 et ω_2 très proches dans les deux analyses, ce qui facilite la conduite de ces deux analyses qui doivent obligatoirement être réalisées en parallèle (chaque terme trouvé doit en effet être soustrait de la série temporelle, avec la bonne fréquence bien sûr, avant de pouvoir déterminer le terme suivant).

2 - Intégration numérique

Le modèle dynamique adopté pour les satellites galiléens est celui de V. Lainey [3], incluant les perturbations dues à l'aplatissement de Jupiter (J_2 et J_4), aux perturbations mutuelles des satellites (non ponctuels, avec J_2 et c_{22}) et aux perturbations solaires (introduites par l'intermédiaire de DE406). L'intégrateur utilisé est celui d'Everhart [4] (RA15 appliqué aux équations différentielles d'ordre 2 en coordonnées cartésiennes jovicentriques) Les conditions initiales sont celles déterminées par V. Lainey par ajustement de son intégration numérique du même modèle sur plus d'un siècle d'observations.

Cependant, pour éviter d'introduire des dérives séculaires dans les mouvements des satellites, provoquées par les perturbations solaires, c'est la version DE404 qui a été utilisée; en effet, il existe de cette version une représentation calculée par Moschier [5], qui exprime DE404 sous forme de séries semi-analytiques de la même forme que VSOP87. Cette représentation est valide sur ± 3000 ans autour de J2000. On peut alors extraire de cette représentation des séries sans terme séculaire ni mixte, ne conservant alors que les termes strictement périodiques pour décrire la position jovicentrique du Soleil. La figure 1 montre comment les positions des galiléens divergent sur ± 2500 ans entre l'intégration numérique utilisant DE404 complet et celle où on supprime les termes solaires séculaires et mixtes. On verra plus loin comment il sera sans doute possible de récupérer ces écarts.

Figure 1 : Ecart entre les positions des satellites calculées par l'intégration numérique avec et sans les termes solaires mixtes et séculaires de DE404 :



L'avantage d'avoir supprimé les termes solaires séculaires et mixtes est de conduire à des mouvements quasi-périodiques pour les satellites galiléens, donc susceptibles d'être analysés facilement par la méthode d'analyse en fréquences.

3 - Résultats de l'analyse : Exemples de solutions

Deux intégrations numériques ont été réalisées sur ± 2543 ans de part et d'autre de la date initiale J1950, l'une avec un pas de 0.075 jour, l'autre avec un pas de 0.075 ($1 + 10^{-8}$) jour. Tous les 100 pas, les positions et vitesses cartésiennes jovicentriques de chaque satellite sont converties en éléments osculateurs jovicentriques : a , λ , z et ζ (où $z = e \exp \iota \varpi$ et $\zeta = \sin(i/2) \exp \iota \Omega$), avec a demi-grand axe, e excentricité, i inclinaison, λ longitudes moyenne, ϖ et Ω longitudes du périjove et du noeud orbital dans le repère équinoxe et écliptique moyen J2000. Ce sont les séries temporelles relatives à ces éléments osculateurs (245760 points espacés de $\Delta t_1 = 7.5$ j et $\Delta t_2 = \Delta t_1(1 + 10^{-8})$) qui sont analysées en parallèle pour déterminer les termes (amplitude, fréquence et phase) constituant leur représentation quasi-périodique.

La Table 1 donne les arguments propres (fréquences et phases) du système dynamique ainsi déterminés dans les diverses séries (on a noté p_i et n_i les arguments propres des péricentres et des noeuds respectivement, L_i ceux des moyens mouvements moyens, ν l'argument des grandes inégalités $L_1 - 2L_2 = L_2 - 2L_3 + \pi$ et ψ celui de la libration correspondant à la résonance $N_1 - 3N_2 + 2N_3 = 0$ (Les N_i sont les moyens mouvements moyens). L'identification de ces arguments se fait par comparaison avec des représentations antérieures, analytiques comme [6], ou synthétiques comme [3].

Table 1 : Arguments propres du système dynamique des satellites galiléens (phases pour J1950)

argument propre	fréquence (rad/j)	phase (deg)	période (j)	période (ans)	pris dans la série
L_1	3.551 552 2862	82.8619	1.769 1377		λ_1
L_2	1.769 322 7125	338.5985	3.551 1811		λ_2
L_3	0.878 207 9236	16.4673	7.154 5532		λ_3
L_4	0.376 486 2334	339.2570	16.689 0176		λ_4
L_S	0.001 450 2150		4 332.938 3	11.86	λ_4
p_1	0.002 664 2479	25.2896	2 358.334	6.45	z_1
p_2	0.000 678 0541	155.7370	9 266.496	25.37	z_2
p_3	0.000 127 2737	121.7911	49 367.495	135.16	z_3
p_4	0.000 032 0639	319.9131	195 958.437	536.48	z_4
n_1	-0.002 315 0964	160.2741	2 714.006	7.43	ζ_1
n_2	-0.000 569 2054	60.0290	11 038.520	30.22	ζ_2
n_3	-0.000 124 9124	191.1874	50 300.713	137.71	ζ_3
n_4	-0.000 030 5605	342.2009	205 598.101	562.88	ζ_4
n_0	0.0	139.0264	∞		ζ_4
ν	0.012 906 8610	125.6942	486.809 714	1.33	z_2
ψ	0.003 050 2334	109.0267	2 059.901 367	5.63	λ_2

Les Tables 2 à 5 donnent une idée des séries de termes obtenues pour quelques uns des éléments osculateurs. Les niveaux de troncature sont de l'ordre de la dizaine de mètres, et le nombre de termes correspondant peut dépasser plusieurs centaines. On montre les premiers termes de chaque développement, puis quelques autres termes, avec leur amplitude, fréquence et phase, ainsi que l'identification de l'argument (fréquence et phase) comme combinaison entière des arguments propres; la phase de chaque terme doit bien sûr s'identifier par la même combinaison entière des phases propres que des fréquences propres. L'identification des termes sous forme de combinaisons entière des arguments propres est faite en respectant les règles de d'Alembert (voir [7] par exemple). Dans ces tables, les valeurs de la colonne $2k$ sont celles données pour chaque terme par la formule (1).

Table 2 : Demi-grand axe a_1 de Io : 422029.955 km + 133 termes > 0.0008 km [série en cosinus]

n°	2k	Amp (km)	Fréquence (rad/j)	Phase (deg)	Période (j)	Identification
1	8	11.400	3.56445914815	208.5499	1.762731	$2L_1 - 2L_2$
2	-18	2.706	7.12891829679	57.0941	0.881365	$4L_1 - 4L_2$
3	4	2.578	1.78222957419	104.2735	3.525463	$L_1 - L_2$
4	-22	1.521	8.91114787099	161.3677	0.705092	$5L_1 - 5L_2$
5	-20	1.418	8.02003308389	199.2309	0.783436	$3L_1 - 3L_3$
6	-26	1.379	10.69337744519	265.6412	0.587577	$4L_1 - 4L_3$
13	0	0.208	0.01358494323	281.5598	462.510972	$\nu + p_2$
16	42	0.109	17.82229574199	322.7354	0.352546	$10L_1 - 10L_2$
25	0	0.045	0.02467531210	11.4214	254.634481	$2\nu + 2n_2$
27	10	0.026	4.46860807007	238.1505	1.406072	$2L_1 - 3L_3 + p_3$
31	0	0.022	0.00305023651	109.0270	2059.901016	ψ
78	0	0.002	0.00145021483	122.5393	4332.589312	L_S
110	80	0.001	33.86236190963	181.1971	0.185550	$19L_1 - 19L_2$

Table 3 : Longitude moyenne λ_2 de Europa : 575.6 km + 240 termes > 0.030 km [série en sinus]

n°	2k	Amp (km)	Fréquence (rad/j)	Phase (°)	Période (j)	Identification
1	0	575.626	0.01303413580	247.471	482.056	$\nu + p_3$
2	0	305.396	0.01293892592	85.594	485.603	$\nu + p_4$
3	0	238.348	0.00000553236	130.645	1135714.5	$p_2 + p_4 - n_1 - n_4 - \psi$
4	4	218.089	1.78222957419	104.273	3.525	$L_1 - L_2$
5	0	-211.048	0.01358495802	281.421	462.514	$\nu + p_2$
6	0	133.901	0.00305023344	108.929	2059.622	ψ
10	0	-42.443	0.01557111428	150.971	403.515	$\nu + p_1$
13	0	21.897	0.00003056203	156.928	205593.168	$n_4 - n_0$
14	0	-21.863	0.00012491210	307.846	50300.463	$n_3 - n_0$
20	0	8.804	0.00055081453	214.004	11409.466	$p_2 - p_3$
33	0	-6.674	0.00009364859	147.446	66593.157	$n_3 - n_4$
73	0	0.675	0.01360336548	326.020	461.885	$\nu + p_3 - n_2 + n_0$
87	0	0.394	0.01357318383	348.613	462.925	$\nu + p_3 - n_2 + n_4$
106	0	0.220	0.01306409651	216.711	480.959	$\nu + p_4 - n_3 + n_0$
107	0	0.216	0.01164117614	123.952	539.737	$\nu - p_3 + 2n_2$

Table 4 : Élément z_3 de Ganymède : 280 termes > 0.012 km [série en exponentielles complexes]

n°	2k	Amp (km)	Fréquence (rad/j)	Phase (deg)	Période (j)	Identification
1	0	1529.448	0.00012727373	121.7911	49367.495564	p_3
2	0	825.524	0.00003206386	319.9129	195958.437648	p_4
3	-2	634.439	-0.01290686152	234.3112	-486.809693	$-\nu$
4	-2	218.993	-0.12523546858	302.1049	-50.170972	$2L_4 - L_3$
5	2	191.118	0.87820792525	16.4514	7.154553	L_3
6	8	121.194	3.55155228625	82.8651	1.769137	L_1
7	-6	70.530	-1.79513643568	310.0368	-3.500115	$2L_3 - L_1$
13	0	-8.057	0.00067805406	336.2450	9266.496039	p_2
14	-2	-7.579	-0.02594099793	166.8462	-242.210624	$-2\nu - p_3$
27	0	2.423	0.00145021445	318.6350	4332.590451	L_S
35	0	-0.910	0.00068429281	99.8278	9182.012707	$-3L_3 + 7L_4 - 3p_4$
57	0	0.359	0.00058842614	123.9267	10677.950578	$-3L_3 + 7L_4 - p_3 - 2p_4$
87	0	-0.132	0.00266424786	205.3102	2358.333622	p_1

Table 5 : Element ζ_4 de Callisto : $7242.3 \text{ km} + 160$ termes $> 0.009 \text{ km}$ [série en exp. complexes]

n°	$2k$	Amp (km)	Fréquence (rad/j)	Phase (deg)	Période (j)	Identification
1	0	7242.263	0.0000000000	139.0264	∞	n_0
2	0	4236.968	-0.0000305605	342.2009	205598.101071	n_4
3	0	-490.389	-0.0001249124	11.1852	50300.712931	n_3
4	0	62.497	0.0029004296	318.5223	2166.294725	$2L_S$
5	0	9.375	-0.0014502147	16.4555	4332.589677	$-L_S$
6	0	-9.305	-0.0005692054	240.0321	11038.520452	n_2
7	0	8.282	0.0014502148	101.2819	4332.589299	L_S
8	0	7.095	0.0043506443	260.9429	1444.196479	$3L_S$
18	-8	-0.394	-3.1750660573	215.4332	1.978915	$L_4 - L_1 + n_0$
21	10	-0.318	3.9280385151	103.1113	1.599573	$L_4 + L_1 - n_0$
23	-2	-0.289	-0.5017216960	281.8437	12.523248	$L_4 - L_3 + n_0$
26	-8	-0.231	-3.1750966177	58.6129	1.978895	$L_4 - L_1 + n_4$
35	0	-0.171	-0.0023151073	341.0728	2713.993128	n_1

Table 6 : Ecart maxima (sur ± 2500 ans et ± 100 ans) en fonction du nombre de termes (troncatures et écarts en mètres)

Nb. de Termes	Io : a_1 (11.4 km + ...)			Callisto : ζ_4 (4228 km + ...)		
	Tronc.	EcM(± 2500)	EcM(± 100)	Tronc.	EcM(± 2500)	EcM(± 100)
40	10	168	101	140	2 135	1 515
80	3	83	61	47	1 178	605
120	1	58	26	19	937	338
160				9	948	240

Nb. de Termes	Ganymède : z_3 (1530 km + ...)			Europa : λ_2 (64.7 km + ...)		
	Tronc.	EcM(± 2500)	EcM(± 100)	Tronc.	EcM(± 2500)	EcM(± 100)
40	768	9 406	9 406	2 494	33 546	20 229
80	160	3 185	2 234	496	12 229	5 951
120	75	1 914	1 336	182	9 702	3 616
160	44	1 209	924	90	8 964	2 315
200	25	1 044	723	49	7 777	1 247
240	18	873	541	30	7 577	1 149
280	12	851	427			

On peut apprécier la convergence plus ou moins rapide de ces développements dans la Table 6 où l'on montre la décroissance des écarts maxima entre l'intégration numérique et un développement tronqué à des multiples successifs de 40 termes: Finalement, on voit que la précision n'est pas donnée par le niveau de troncature, mais vaut généralement plusieurs dizaines de fois ce niveau.

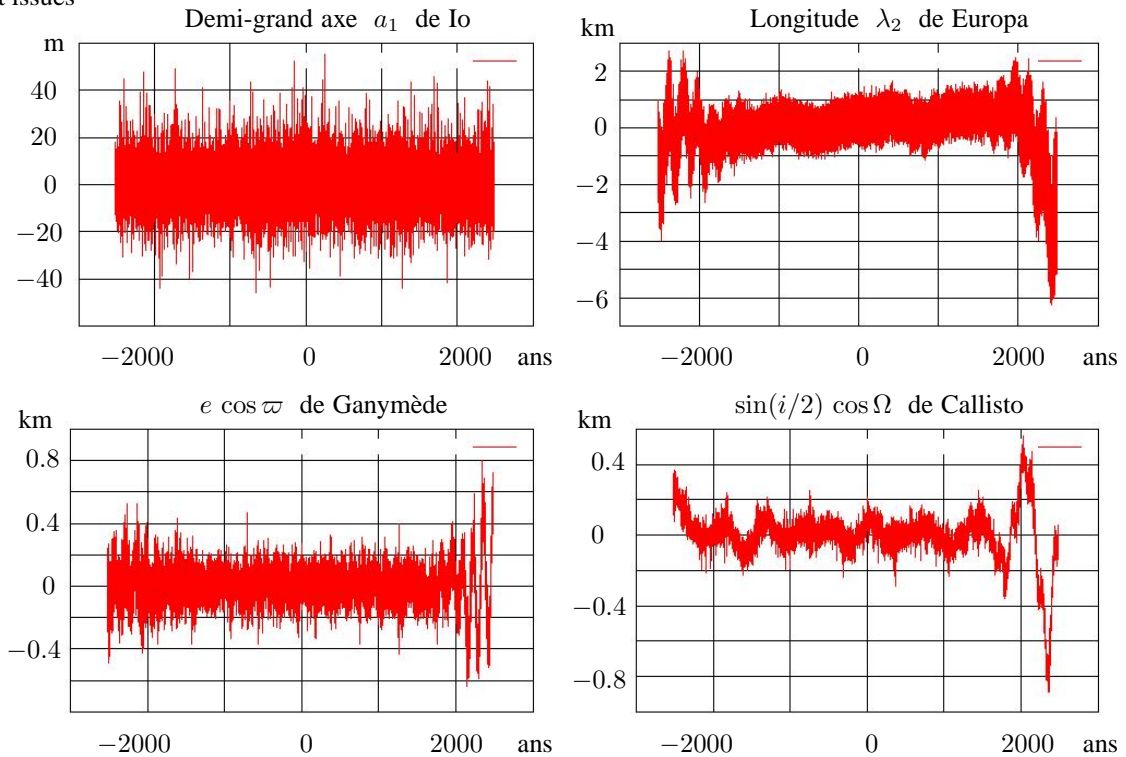
Pour juger de la précision des représentations, la Figure 2 montre, pour les 4 exemples précédents, comment se comportent les écarts entre les développements synthétiques et l'intégration numérique dont ils proviennent.

Conclusion

La méthode employée ici semble adéquate pour représenter, avec une haute précision, l'intégration numérique des mouvements des satellites galiléens sur plusieurs millénaires, tant que l'on peut considérer ces mouvements comme quasi-périodiques. Pour tenir compte maintenant des termes solaires séculaires et mixtes, il resterait à représenter d'une certaine façon les écarts entre les développements quasi-périodiques

tels qu'on les a montrés ici, et une intégration numérique qui tiendrait compte complètement des termes solaires séculaires et mixtes (on pourrait probablement représenter ces écarts en polynômes de Tchebychef, ou en développant en termes mixtes certains termes identifiés comme étant associés à des termes de perturbation solaire). On espère alors aboutir à une théorie synthétique plus précise encore que les théories actuelles. L'application de cette méthode à d'autres systèmes de satellites, comme ceux de Saturne pourrait sans doute être aussi envisagée avec intérêt.

Figure 2 : Ecarts sur ± 2500 ans entre les représentations synthétiques et l'intégration numérique dont elles sont issues



Bibliographie

- [1] Duriez L., Vienne A., 1997, Theory of motion and ephemerides of Hyperion, *A&A* 324, 366
- [2] Laskar J., 2003, Frequency map analysis and quasiperiodic decompositions, *Proceedings of Porquerolles School* (2001)
- [3] Lainey V., Duriez L., Vienne A., 2006, Synthetic representation of the Galilean satellites orbital motions from L1 ephemerides, à paraître dans *A&A*
- [4] Everhart E., 1985 An order 15 Gauss-Radau formula for N-body simulations. in *IAU Colloq. 83, Dynamics of Comets: Their Origin and Evolution*, ed. A. Carusi, & G. B. Valsecchi (D. Reidel Publishing Company), 185
- [5] Moshier S., 2000, Plan404 ephemerides : <http://www.moshier.net/aadoc.html>
- [6] Duriez L., 1982, Théorie générale planétaire étendue au cas de la résonance, *Application aux satellites galiléens de Jupiter*, *Cel. Mech.* 26, 231
- [7] Duriez L., 2003, Routines Maple pour développer la fonction perturbatrice des planètes et des satellites; Exemples de calculs de théorie générale d'ordre 1 http://www.univ-lille1.fr/lal/mecanique_celeste.html

L'inégalité de De Haerdtl : une richesse dynamique insoupçonnée dans le système des satellites galiléens

Benoît Noyelles & Alain Vienne

Résumé

L'objet de cette étude est d'examiner les effets dynamiques de l'inégalité de De Haerdtl 7 : 3 entre les satellites galiléens de Jupiter Ganymède et Callisto, au moyen d'outils numériques de détection et d'analyse de chaos. Nous montrons que l'inégalité de De Haerdtl est inductrice de chaos, et que le chaos est important à partir du moment où l'une ou l'autre des excentricités de Ganymède et Callisto est supérieure à 3×10^{-3} , ce qui est le cas actuellement. Cependant, l'obliquité de Jupiter est en partie responsable de ce chaos.

Introduction

Les 4 satellites galiléens, J-1 Io, J-2 Europe, J-3 Ganymède et J-4 Callisto, sont particulièrement massifs. Ces masses ont pour conséquence d'importantes perturbations mutuelles qui provoquent un certain nombre de phénomènes intéressants. Après une courte revue de ces phénomènes nous détaillons une étude numérique du chaos induit par l'inégalité de De Haerdtl. Cette inégalité résulte d'une quasi-commensurabilité de moyens mouvements 7 : 3 entre Ganymède et Callisto. Ses effets dynamiques à long terme sont méconnus, et tous les scénarii d'évolution orbitale des satellites galiléens la négligent.

1. La dynamique des satellites galiléens

La dynamique des satellites galiléens se caractérise essentiellement par la résonance dite laplacienne impliquant Io, Europe et Ganymède. De nombreux scénarii ont été élaborés dans le passé afin d'expliquer la capture dans cette résonance.

1.1 Une grande richesse dynamique

L'importance des masses des satellites galiléens provoque un certain nombre de termes à longue période, des libérations, une résonance, ainsi qu'une grande inégalité. Plus précisément on a :

- $\lambda_1 - 2\lambda_2 + \varpi_1$ libre autour de 0 en 1.7 jour
- $\lambda_1 - 2\lambda_2 + \varpi_2$ libre autour de π en 486 jours
- $\lambda_2 - 2\lambda_3 + \varpi_2$ libre autour de 0 en 486 jours
- $\lambda_1 - 3\lambda_2 + 2\lambda_3$ est en résonance (dite laplacienne), ce qui provoque une libération de cet argument autour de π , d'amplitude 0.5° , et de période 2060 jours
- $3\lambda_3 - 7\lambda_4$ circule en 8058 jours, car les moyens mouvements de Ganymède et Callisto sont en quasi-commensurabilité 7 : 3 (inégalité de De Haerdtl)

On ne peut parler de résonance pour les 3 premiers arguments. La libération de ces arguments est un simple effet géométrique dû au fait que ceux-ci sont des combinaisons entières de coordonnées et non de modes propres. En effet, l'importance des perturbations mutuelles (due aux masses) rend les nœuds et péri-centres inassimilables aux éléments propres, comme le montre le tableau 1. Dans ce tableau, les éléments propres sont notés de ν_0 à ν_8 , ν_0 désignant le plan invariant du système des satellites galiléens, ν_1 à ν_4 les modes propres proches des péri-centres respectivement d'Io, Europe, Ganymède et Callisto, et ν_5 à ν_8 les modes propres proches des nœuds ascendants de ces mêmes satellites.

1.2 Différents modèles d'évolution

Depuis la fin des années 70 et la découverte des marées sur Io, de nombreux auteurs ont tenté d'expliquer la formation de la résonance laplacienne.

z_3	amplitude	période	ident.	ζ_4	amplitude	période	ident.
	1530 km	135.2 ans	ν_3		14471 km	∞	ν_0
	826 km	536.5 ans	ν_4		8457 km	562.9 ans	ν_8
	634 km	1.3 ans	$\lambda_1 - 2\lambda_2$		981 km	137.7 ans	ν_7

TAB. 1 – Solutions de $z_3 = e_3 \exp(\sqrt{-1}\varpi_3)$ et $\zeta_4 = \sin \frac{i_4}{2} \exp(\sqrt{-1}\Omega_4)$ dans les éphémérides L1-2 (Lainey et al. 2006 [4]). On constate par exemple que le péricentre de Ganymède ϖ_3 ne peut pas être considéré comme un mode propre puisque le deuxième terme de la décomposition en fréquences de z_3 a une amplitude supérieure à la moitié du premier, donc n’est pas négligeable. Le cas de ζ_4 est intéressant puisqu’il montre l’importance du plan invariant.

Dans les années 80, des travaux analytiques ont conduit à l’élaboration, notamment par Peale, Yoder & Henrard, de scénarii dans lesquels Io et Europe sont d’abord capturés dans une résonance 2 : 1, puis migrent en résonance, sous l’effet des marées, jusqu’à capturer Ganymède dans la résonance laplacienne. Par contre, Greenberg élaborait un scénario de formation primordiale de la résonance laplacienne.

Dans les années 90, les outils numériques ont permis de faire moins d’approximations, notamment les commensurabilités 2 : 1 Io-Europe et Europe-Callisto ne sont plus assimilées à des résonances. Ainsi, Showman et Malhotra (1997 [8]) ont élaboré différents scénarii dans lesquels Io, Europe et Ganymède ont connu d’autres résonances d’ordre 2 des masses avant la résonance laplacienne actuelle.

Enfin, Peale & Lee (2002 [7]) ont utilisé le modèle de formation de Canup & Ward (2002 [1]) pour élaborer un scénario de formation primordiale de la résonance laplacienne.

Aucun de ces scénarii ne prend en compte l’inégalité de De Haerdtl, c’est ce qui a motivé notre étude.

2. Étude de l’inégalité de De Haerdtl

Nous avons voulu nous focaliser sur l’inégalité de De Haerdtl afin de savoir s’il est légitime ou non de la négliger. Pour cela, nous avons considéré le système des satellites galiléens avant la formation de la résonance laplacienne. Ainsi, la fréquence de libration associée à l’argument résonant, actuellement de 2060 jours, n’intervient jamais. De plus, notre étude est numérique, car le nombre d’arguments associés à l’inégalité de De Haerdtl (plus de 200) rend déraisonnable toute étude analytique.

2.1 La méthode

Du fait des échelles de temps d’évolution d’un tel système (de l’ordre de plusieurs centaines de millions d’années), nous avons réalisé des intégrations numériques à long terme, dans lesquels les termes à courte période étaient moyennés. Cette moyennisation résultait d’une séparation analytique des différentes perturbations à l’aide des routines Maple de Duriez (2000 [3]), puis d’une moyennisation analytique.

Nous avons tenu compte des 4 satellites galiléens, et utilisé un système de 21 variables. Pour chaque satellite, les variables utilisées étaient :

- a : demi-grand axe
- $h = e \cos \varpi$
- $k = e \sin \varpi$
- $p = \sin \frac{i}{2} \cos \Omega$
- $q = \sin \frac{i}{2} \sin \Omega$

De plus, nous avons utilisé comme 21ème variable $3\lambda_3 - 7\lambda_4$, relative à l’inégalité de De Haerdtl.

Les perturbations prises en compte étaient :

- l’aplatissement de Jupiter, avec les termes en J_2 , J_4 et J_2^2
- les perturbations mutuelles séculaires
- les perturbations séculaires solaires (solution à long terme de Laskar 1988 [5])
- l’inégalité de De Haerdtl

Les potentiels associés à ces perturbations sont développés jusqu’au degré 2 en excentricité / inclinaison, à l’exception des termes liés à l’inégalité de De Haerdtl qui le sont au degré 4 (soit au degré le plus bas).

Paramètre	valeur actuelle	partie forcée	partie libre
e_3	1.53×10^{-3}	9.6×10^{-4}	5.7×10^{-4}
$\gamma_3 = \frac{i_3}{2}$	1.93×10^{-3}	7.9×10^{-4}	1.14×10^{-3}
e_4	7.37×10^{-3}	2.1×10^{-4}	7.16×10^{-3}
$\gamma_4 = \frac{i_4}{2}$	3.93×10^{-3}	3.93×10^{-3}	faible

TABLE 2 – Paramètres dynamiques de Ganymède et Callisto. Ces valeurs ont été obtenues avec notre système d'équations et des conditions initiales issues de la théorie L1-2 privée des termes n'intervenant pas dans notre système.

2.2 Le chaos

Il est important de savoir si cette inégalité est inductrice de chaos, pour cela nous avons utilisé la méthode des cartes de fréquence de Laskar (1993 [6]) pour détecter ce chaos et déterminer ses conditions d'apparition en fonction des valeurs des excentricités et des inclinaisons.

Les valeurs actuelles d'excentricités et d'inclinaisons de Ganymède et de Callisto sont recensées Table 2. On peut remarquer la distinction d'une partie libre et d'une partie forcée. La partie forcée est la valeur moyenne du paramètre considéré lorsque sa condition initiale est très faible, tandis que la partie libre est liée directement à la condition initiale. Cette partie libre représente la marge de manœuvre que l'on a pour faire varier un paramètre dynamique indépendamment des autres. On peut notamment remarquer que l'inclinaison actuelle de Callisto est entièrement forcée, ceci est dû à l'inclinaison du Soleil par rapport à l'équateur jovien, donc en fait à l'inclinaison de Jupiter.

Les cartes obtenues sont constituées de 5700 points qui diffèrent par leurs conditions initiales a_3 et a_4 . a_3 varie entre 1070150 et 1070700 km, et a_4 entre 1883080 et 1883200 km. Ainsi, le rapport des demi-grands axes α varie entre 0.56826 et 0.56859, ceci afin de couvrir la zone où sont localisées les résonances associées à l'inégalité de De Haerdtl.

Nous avons également cherché à identifier les résonances responsables de l'éventuel chaos détecté, pour cela nous avons, au cours de nos simulations numériques, reconstruit les différents arguments liés à l'inégalité de De Haerdtl afin de visualiser leur comportement. Ces simulations numériques ont été réalisées avec comme conditions initiales les valeurs actuelles des paramètres dynamiques, à l'exception de a_3 , variable comme dans le cas des cartes.

3. Résultats

3.1 Conditions d'apparition du chaos

La Figure 1 montre deux cartes de fréquence pour des paramètres dynamiques actuels avec et sans l'inégalité de De Haerdtl. On peut constater clairement qu'avec ces valeurs, l'inégalité de De Haerdtl est inductrice de chaos.

En faisant varier les parties libres des excentricités et inclinaisons, on constate que :

1. Lorsque e_4 (excentricité de Callisto) est petit, le chaos est important pour $e_3 > 3 \times 10^{-3}$.
2. Avec la valeur actuelle d' e_3 (1.5×10^{-3}), le chaos est important pour $e_4 > 3 \times 10^{-3}$ (actuellement, e_4 vaut environ 7×10^{-3} , donc les valeurs actuelles de e_3 et e_4 vérifient cette condition).
3. Il y a toujours au moins un peu de chaos. La raison est la valeur forcée de l'inclinaison de Ganymède γ_4 . Ceci veut dire que le chaos induit par l'inégalité de De Haerdtl est en partie dû à l'obliquité de Jupiter

3.2 Identification du chaos

Dans un système planétaire, le chaos est généralement dû à la diffusion de Chirikov (1979 [2]), qui consiste en la superposition de différentes résonances. Les résultats sont en cours d'analyse, mais déjà des captures en résonances (stables ou instables, cf. Fig.2) ont été observées, ainsi que des cas de chaos stable (le système oscille aléatoirement d'une résonance à l'autre), signe d'un recouvrement de résonances. Des cas de résonance séculaire semblent également apparaître.

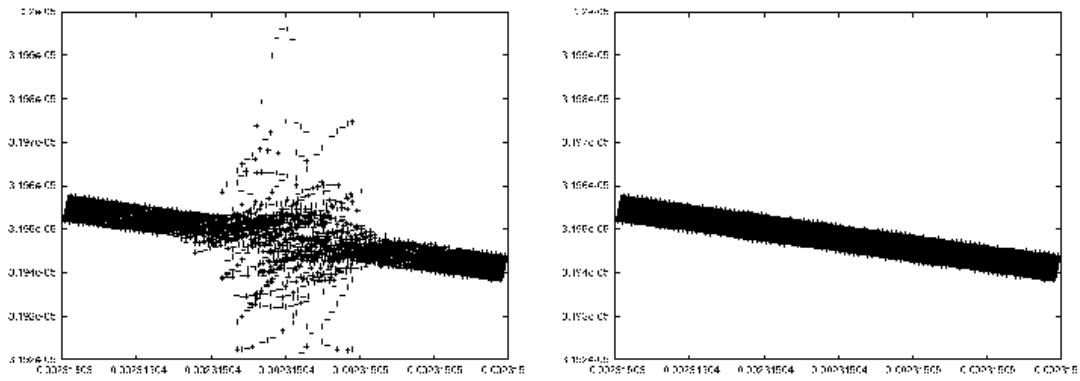


FIG. 1 – Cartes de fréquences (ν_1, ν_4) pour le système considéré avec les valeurs actuelles d'excentricité et d'inclinaison, en tenant compte de l'inégalité de De Haerdtl (à gauche) et sans en tenir compte (à droite). La forte dispersion sur la carte de gauche, comparée à la régularité de la carte de droite, indique clairement que l'inégalité de De Haerdtl est inductrice de chaos.

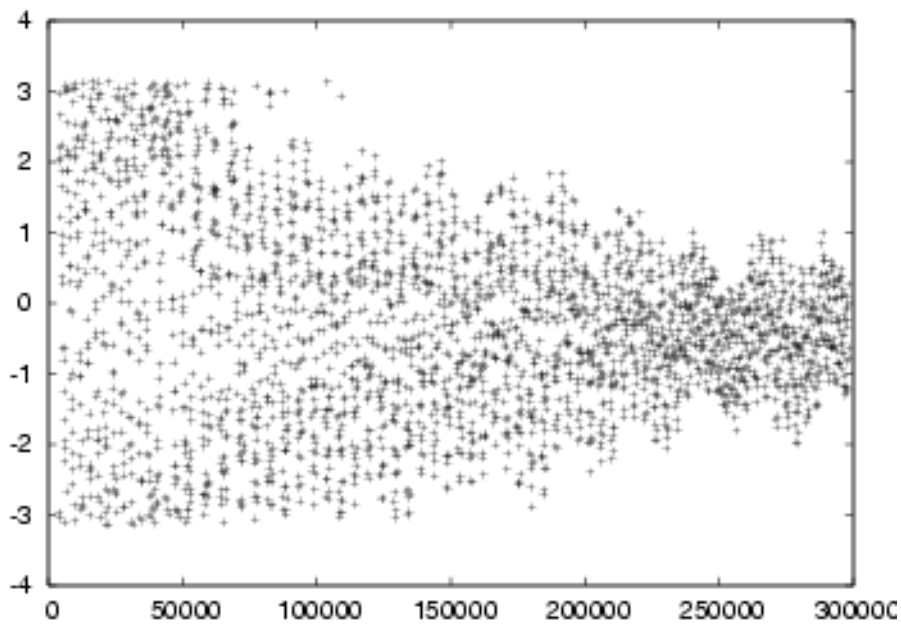


FIG. 2 – Capture dans la résonance d'argument $3\lambda_3 - 7\lambda_4 + 2\nu_0 + \nu_3 + \nu_4$. L'unité de temps est l'année.

4. Conclusion et perspectives

L'inégalité de De Haerdtl est inductrice de chaos, avec les valeurs actuelles d'excentricités et d'inclinaisons. L'identification du chaos, une fois terminée, permettra de connaître les principales résonances qui en sont responsables. Ceci sera un point de départ pour l'élaboration de scénarii incluant la résonance laplacienne. Ces scénarii devront tenir compte de l'évolution à long terme de l'obliquité de Jupiter, dont l'importance a été soulignée. Nous espérons qu'ils expliqueront l'actuelle différenciation de Ganymède par une ancienne excentricité élevée de ce satellite, preuve d'un épisode de chauffage important par les marées.

Références

- [1] Canup R.M. & Ward W.R., 2002, *AJ*, 124, 3404
- [2] Chirikov B.V., 1979, *Physics Reports*, 52, 263
- [3] Duriez L., 2000, *Notes Scientifiques et Techniques de l'IMCCE*, S076, 7
- [4] Lainey V., Duriez L. & Vienne A., 2006, *A&A*, sous presse
- [5] Laskar J., 1988, *A&A*, 198, 341
- [6] Laskar J., 1993, *Physica D*, 67, 257
- [7] Peale S.J. & Lee M.H., 2002, *Science*, 298, 593
- [8] Showman A.P. & Malhotra R., 1997, *Icarus*, 127, 93

Structure et organisation du serveur Web de l'IMCCE

Christian Bakabadio, Pascal Descamps, Jérôme Berthier

1. Structure des serveurs

a. Définitions

On appelle serveur une machine mettant à disposition ses ressources afin que celles-ci soient exploitées par d'autres machines : un partage de service.

Le terme serveur web^[1] désigne :

- un ordinateur tenant le rôle de serveur informatique sur lequel fonctionne un logiciel serveur HTTP ;
- le logiciel serveur HTTP lui-même. La plupart des ordinateurs utilisés comme serveur Web sont reliés à internet et hébergent des sites web.

Un serveur HTTP^[2] ou démon HTTP ou HTTPd (HTTP daemon) ou (moins précisément) serveur web est un logiciel servant des requêtes respectant le protocole de communication client-serveur HyperText Transfer Protocol (HTTP). Les serveurs web les plus utilisés sont : Apache HTTP Server, Internet Information Services, Sun Java System Web Server, le serveur web Zeus ; le plus populaire étant Apache.

Un site web^[3] est un ensemble de pages web et d'éventuelles autres ressources, hyperliées en un ensemble cohérent, conçu pour être consulté avec un navigateur web et mis à disposition par un même auteur (organisme ou individu). Un site web (site internet) a une adresse web, le web reposant sur internet.

On dit qu'un site est mis en ligne par son propriétaire lorsqu'il est accessible de l'extérieur depuis un navigateur par un quelconque utilisateur.

b. Serveurs de production, de développement et secondaire

Partant du principe que pour mieux servir il faut avoir les ressources nécessaires, l'Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides s'est doté de trois serveurs dédiés aux services HTTP, afin de mieux gérer et fournir la quantité d'information mise à disposition du public.

Le serveur de production (ou serveur principal) est le serveur officiel. Afin de ne pas le surcharger lors des test et/ou développement de nouveaux modules, un serveur de test a été mis en place, sur lequel est installée une réplique des services web de l'Institut. Enfin le serveur "secondaire" contient tous les programmes n'ayant pas pu être portés sur le serveur de production, pour cause d'incompatibilité ou de débogage.

L'authentification sur ces serveurs et la modification des pages ne sont possibles qu'en local. Le site web de l'Institut, les services encore présents sur le serveur secondaire ainsi que la réplique du site sur le serveur de test sont tous accessibles à partir d'un navigateur.

c. Bugle

Afin d'identifier humainement les serveurs, ces derniers ont été nommés au sein du service informatique de l'Institut. **Bugle** est donc le nom que porte le serveur de production de l'IMCCE. C'est le serveur web.

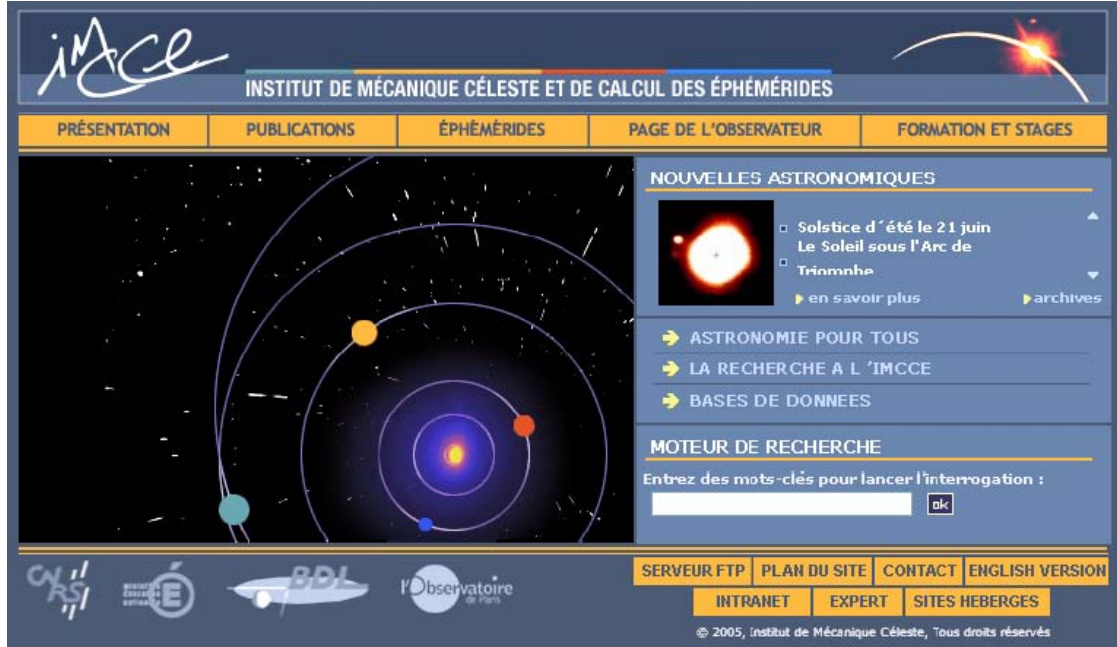
Ce serveur héberge le site web de l'IMCCE, accessible à l'url www.imcce.fr

Ouvert depuis décembre 2004, les statistiques ont montré que le site accueille environ 63.000 visiteurs différents^[4] par mois habituellement et environ 80.000 lors des grands événements comme les éclipses.

2. Organisation du serveur web

a. Utilisation de PHP et MYSQL

En décembre 2004, le nouveau portail du site était ouvert.



Avec cette nouvelle interface étudiée et épurée, la mise en place de ce portail avait nécessité et a permis l'utilisation intelligente du couple PHP/MYSQL. L'ensemble du site est essentiellement codé en langage PHP.

Ainsi, on peut citer comme exemple :

- la page des nouvelles astronomiques qui est totalement gérée grâce à une base de données, pilotée en Php. La page est donc construite en fonction du contenu de la base. Les informations affichées peuvent être la date d'enregistrement de la nouvelle ainsi que son titre et son contenu. Grâce à ce système, on construit également les archives des nouvelles astronomiques groupées par année ;
- le menu de navigation interne qui permet de rejoindre une sous-rubrique adjacente, sans avoir à remonter toute la rubrique parent. A l'aide de ce menu, la liste déroulante des sous-rubriques adjacentes est accessible par simple clic. Cette liste est construite de façon autonome à partir d'informations figurant dans la base de données ;
- tout comme les actualités ou le menu de navigation, la construction du plan du site est elle aussi automatisée. Les rubriques sont disposées dans la base de données avec un identifiant unique et un champ supplémentaire permettant d'identifier leur parent. Cela permet récursivement de construire chaque bloc du plan ;
- certaines éphémérides, à défaut d'être interactives, sont précalculées et stockées dans la base de données. De cette façon, il suffirait d'alimenter cette dernière pour que les pages sur les éphémérides soient mises à jour automatiquement ;
- le sommaire de chaque rubrique fait partie lui aussi des pages construites de façon automatique en alliant la puissance de Php et son interconnexion avec la base de données MySQL.

b. Les principaux répertoires

Le site de l'IMCCE est organisé en répertoires dont les plus importants sont :

- /fr pour la version française
- /en pour la version anglaise
- /hosted_sites pour les sites hébergés
- /commons qui regroupe les fichiers communs.

Cette organisation permet de regrouper les informations en 5 grandes rubriques, chacune étant traduite aussi bien en français qu'en anglais (partiellement). Il est à noter que chaque rubrique contient une ou plusieurs sous-rubriques qui contiennent une ou plusieurs sous sous-rubriques, etc.

Dans la rubrique 'PRESENTATION' on y trouve le descriptif complet de l'histoire et des activités de l'IMCCE.

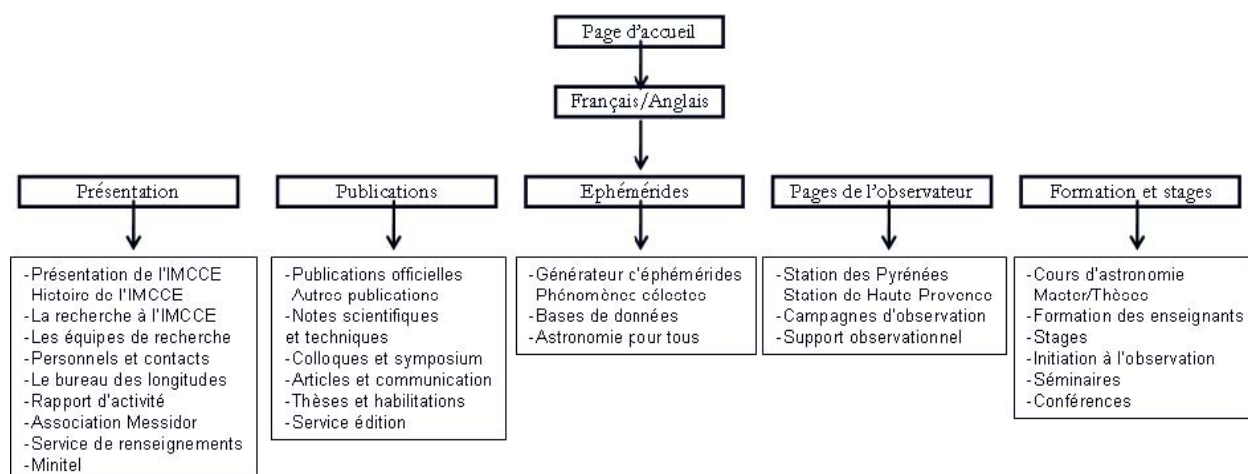
La rubrique 'PUBLICATIONS' présente toutes les publications officielles de l'IMCCE ainsi que les colloques et les articles permettant de diffuser les travaux originaux liés aux recherches en mécanique céleste, en mathématiques, en astronomie, etc.

Les 'EPHEMERIDES', grosse rubrique du site, regroupe les services interactifs comme les éphémérides pour l'observation physique, le calcul des levers et couchers des astres. Elle répertorie aussi une pile d'informations sur la lune du mois, les calendriers, les saisons, etc.

Dans les 'PAGES DE L'OBSERVATEUR' on retrouvera des informations sur la station de planétologie des pyrénées, la station d'astrométrie des Alpes de Haute-Provence ainsi que les campagnes d'observations des phénomènes des satellites.

Enfin, pour se former à l'astronomie, consulter les offres de stages de l'IMCCE ou encore connaître les dates des séminaires, il suffira de visiter la rubrique 'FORMATION ET STAGES'.

Les répertoires /hosted_sites et /commons étant indépendants de la langue du site, il est donc possible de schématiser ce dernier en version française et anglaise de la façon suivante :



c. Les statistiques

Afin de mieux répondre à la demande du public, un système de gestion des statistiques a été mis en place pour scanner la fréquence de visite des utilisateurs et déterminer la fréquence de consultation des pages du site.

Grâce à ce système, nous avons pu constater que les pages du serveur web étaient le plus visitées en semaine les mardi, mercredi et jeudi avec environ 22.138 visites en moyenne par jour. Le serveur accueille environ 67.200 visiteurs différents par mois (plus de 80.000 visiteurs lors des grands événements).

Les pages les plus visitées sont celles du service SKYBOT, des éphémérides (éclipses, éphémérides de position, phases de la Lune, etc.) ainsi que le service 'Promenade dans le système solaire'.

Il est intéressant de noter que l'utilité de ces statistiques est de cibler les utilisateurs afin de permettre la mise en évidence sur la page d'accueil du site les informations des pages les plus consultées.

3. L'avenir

L'organisation actuelle du serveur web rencontre quelques petits soucis qui ne seront pas détaillés ici. La prochaine étape consistera à résoudre ces problèmes grâce à une reorganisation optimisée, et à l'utilisation plus performante du couple PHP/MYSQL. Il sera éventuellement possible d'utiliser les templates, concept de modèles qui pourrait être introduit dans le site.

Il sera surtout question :

- d'équilibrer les versions française et anglaise afin qu'elles soient le plus à jour possible
- de remettre à jour les rubriques qui n'ont pas beaucoup évoluées depuis l'ouverture du nouveau portail
- d'optimiser complètement l'utilisation des bases de données
- d'uniformiser dans sa globalité le site, grâce au concept de modèle.

4. Ressources

- [1] http://fr.wikipedia.org/wiki/Serveur_Web
[2] http://fr.wikipedia.org/wiki/Serveur_HTTP
[3] http://fr.wikipedia.org/wiki/Site_Web
[4] Statistiques de mai 2006

Les objets du système solaire dans l'Observatoire Virtuel

W. Thuillot, J. Berthier, V. Lainey, F. Vachier, J.-E. Arlot

Introduction

Le projet international *Observatoire Virtuel* ouvre des horizons nouveaux pour la recherche, objet principal de son développement mais aussi pour les services. L'IMCCE se doit d'assurer une présence experte dans ce domaine. Le projet que nous avons mis sur pied est destiné à l'assurer. Dans ce cadre, nous avons mis en œuvre plusieurs développements concernant les objets du système solaire pour lesquels actuellement peu d'effort semblent avoir été produits.

1. L'Observatoire Virtuel

L'Observatoire Virtuel (OV) est un projet international. Il est fondé sur la mise en commun de ressources, outils, modèles et données astronomiques, grâce à l'usage de protocoles de communication spécifiques définis par des standards internationaux. Il met en œuvre pour cela la capacité d'interaction de serveurs ou de logiciels, l'interopérabilité. Le projet OV a pour but principal de permettre l'exploration de l'univers archivé ; il est piloté par la recherche.

Ce projet se développe grâce à la mise en place de structures nationales qui se sont fédérées au niveau international sous l'égide de l'International Virtual Observatory Alliance (fig. 1). On y retrouve les structures européenne AVO, allemande (GAVO), du Royaume Uni (AstroGrid), du Japon (JVO) etc. En France, l'Action spécifique OV France (ASOVF) est depuis 2004 la structure, soutenue par le CNRS/INSU et le CNES, en charge de favoriser actuellement essentiellement les déplacements pour des colloques ou des collaborations actives entre les équipes. Un colloque d'ouverture de l'ASOVF en 2005 et d'autres rencontres nous ont ainsi permis de présenter un projet OV propre à l'IMCCE et s'intéressant aux objets du système solaire (Thuillot et al. 2005c, 2005d)

Fig. 1 : L'International VO Alliance (IVOA) regroupe les principales structures nationales dont l'ASOVF depuis 2004



Les développements couramment accessibles dans l'Observatoire Virtuel concernent principalement les objets astrophysiques étudiés, analysés et modélisés dans le cadre des grands projets internationaux. Il est notable que peu de fonctionnalités des outils de l'OV concernent les objets du système solaire actuellement. Il est par ailleurs

également notable que la plupart des grands projets de la discipline incluent maintenant une réflexion sur le formatage des données, leur stockage et diffusion dans les standards internationaux propres à l'OV. Les grands organismes internationaux, NASA, ESA, ESO, CNES, DLR etc., ont tous d'ailleurs une activité importante de structuration dans ce domaine.

2. Le projet de l'IMCCE

Le projet OV-IMCCE consiste à installer dans le cadre de l'Observatoire Virtuel des services de diffusion d'éphémérides, des outils spécifiques de construction d'éphémérides, des bases de données propres aux objets du système solaire. Cela implique aussi bien l'adaptation de services web actuellement existants pour les rendre capables de traiter des requêtes que le développement de nouveaux services.

Les opérations de base qui s'inscrivent dans le cadre de l'OV (Fig. 2) sont celles qui permettent les actions suivantes :

- examiner de nombreuses bases de données pour en filtrer les données utiles
- en extraire ces données utiles à l'établissement de modèles dynamiques,
- procéder à une modélisation dynamique, par exemple par intégration numérique, capable de représenter au mieux les mouvements des objets concernés
- procéder à des ajustements et des comparaisons à un ensemble d'observations,
- mettre en forme des éphémérides aptes à prévoir par exemple des phénomènes particuliers ou à être une aide à l'observation.

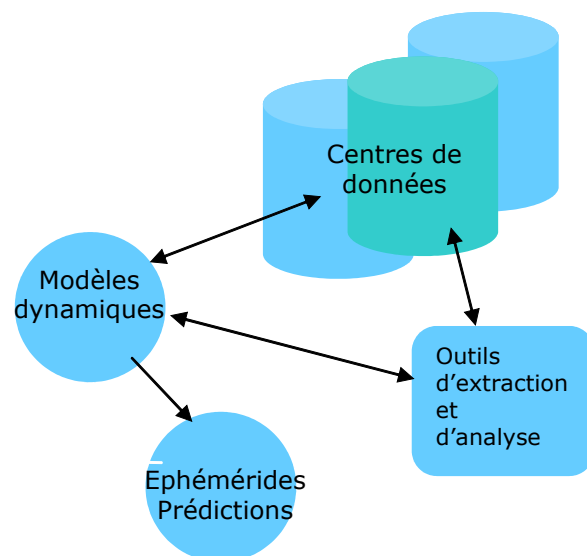


Fig. 2 : schéma des interactions intervenant dans la réalisation d'éphémérides

Ces opérations sont bien sûr réalisables en dehors de l'OV. Mais ce qu'apporte ce cadre est essentiellement une rapidité d'exécution dans un environnement réparti sans commune mesure avec des moyens anciennement disponibles. Il suffit pour s'en convaincre de prendre connaissance de la récente découverte de 40 quasars par une analyse de champs profonds grâce à des outils OV (Padovani et al., 2004). L'accès aux bases de données, en particulier, permet l'exploration automatique de nombreux ensembles répartis dans de nombreux centres liés à des observatoires spatiaux, des observatoires au sol, des instituts.

3. Les premières réalisations

Notre activité s'est tout d'abord focalisée sur les aspects d'analyse de bases de données, de détection d'objets du système solaire et d'extraction de positions astrométriques.

En collaboration avec le Centre de données de Strasbourg (CDS), nous avons tout d'abord effectué une première opération d'interconnexion des serveurs du CDS et de l'IMCCE en 2003. Cette opération a consisté à inclure un calcul automatique d'éphémérides dans les options du gestionnaire de catalogues VizieR du CDS à l'appel du catalogue d'astéroïdes Astorb (Bowell, 2006).

Nous avons ensuite développé un outil plus complexe d'identification des objets du système solaire dans un champ stellaire. Cet outil, dénommé SkyBoT (Sky Bodies Tracker), est fondé sur une gestion d'une base de données d'éphémérides calculées sur l'intervalle 1949-2009 de tous les objets contenus dans la base de données Astorb. Il permet sur une requête de détection d'objets du système solaire dans un champ stellaire quelconque défini par les coordonnées célestes de son centre, sa taille et une date, d'obtenir une réponse exhaustive en quelques secondes. Le processus consiste à établir une relation entre un découpage de la sphère céleste par zones de quelques dizaines de minutes de degrés et les numéros d'astéroïdes qui y sont contenus à chaque date de l'intervalle 1949-2009. Il en résulte une vaste base de données d'éphémérides « pré-calculées » de plus de 1 Teraoctets apte à fournir les positions précises des astéroïdes concernés et exclusivement ceux-là.

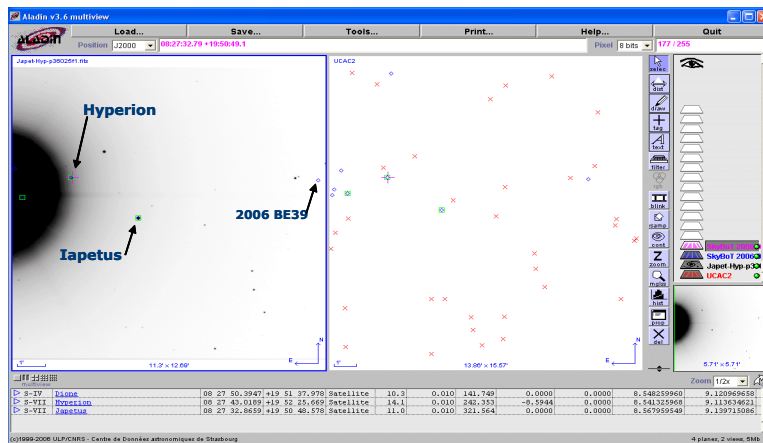


Fig. 3 : Exemple de réponse à une requête « SkyBoT » dans Aladin pour la détection d'objets du système solaire du champ voisin de Saturne où apparaissent deux satellites et un astéroïde (image T120 OHP)

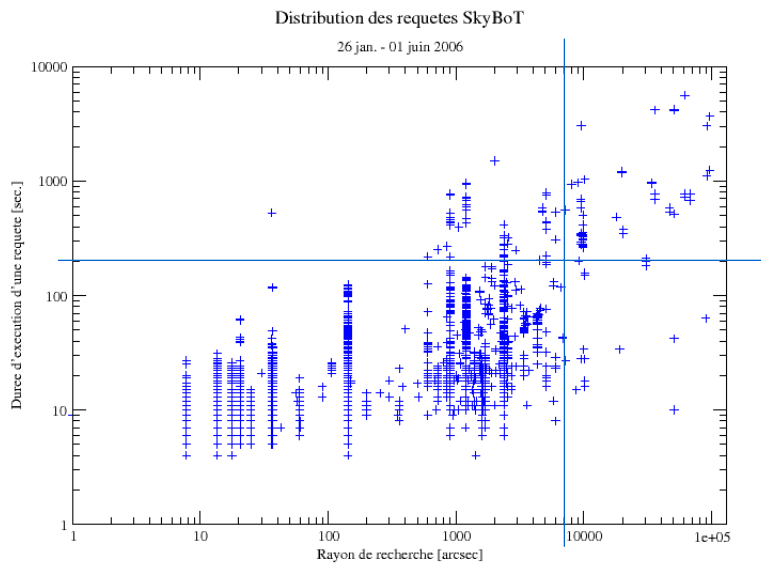


Fig. 4 : Distribution des requêtes au logiciel SkyBoT : Temps de réponse (s) versus rayon de la zone de recherche (arcsec.)

En janvier 2006, ce logiciel implanté dans l'atlas céleste Aladin du CDS a été ouvert publiquement avec la nouvelle version (version 3.6) de Aladin (Fig. 3).

Depuis cette ouverture les statistiques des connexions permettent d'apprécier les spécificités de ce service sur 5 mois d'utilisation. La figure 4 montre ainsi la distribution des temps de réponse en fonction des différents rayons de recherche d'objets. Ceux-ci restent inférieurs à 200 secondes de temps pour des rayons inférieurs à 2 degrés.

De même la figure 5 montre le nombre de requêtes effectuées en fonction de l'époque des clichés concernés. Ces requêtes sont très nombreuses pour l'époque récente puisqu'elles atteignent globalement plus de 110 000 requêtes au total dont l'essentiel concerne les années postérieures à 1995.

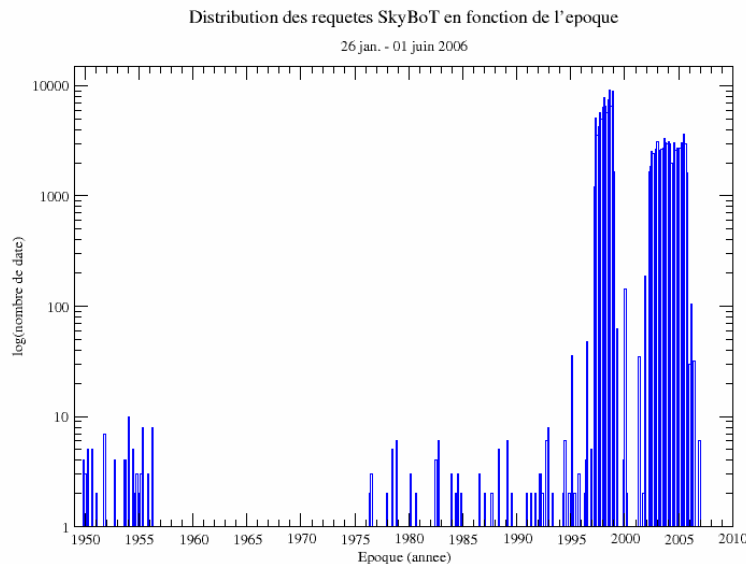


Fig. 5 : Distribution des requêtes au logiciel SkyBoT en fonction de l'époque

Conclusion

Nous avons entrepris le développement d'outils, de bases de données et de services du cadre Observatoire Virtuel. Ce développement est aussi un composant d'un plus vaste projet coordonné au niveau de l'Observatoire de Paris (Simon et al. 2006). Ce travail a été rendu possible en particulier grâce à la collaboration avec le Centre de Données de Strasbourg et l'expérience de ses équipes dans ce domaine. Nos premières réalisations concernent la détection d'objets du système solaire dans des champs stellaires. L'outil SkyBoT conçu pour ce service a été implanté dans l'atlas céleste Aladin du CDS (version 3.6 de janvier 2006). L'étape suivante consiste à mettre une forme une version automatisée (workflows) de ce logiciel constituant ainsi un outil OV de fouille d'archives numérisées.

Références

- Berthier J., Vachier F., Thuillot W., Lainey V., Arlot J.-E.: 2005a, The Virtual Observatory and the IMCCE's projects, SF2A, Semaine de l'Astrophysique française, 27 juin- 1er juillet, SF2A
- Berthier J., Didelon, Le Sidaner P., Sarkissian A., Desert J.-M., Poulleau G., Orcesi J.-L., Chevalier L., Schneider J., Vachier F., Thuillot W., Lainey V., Arlot J.-E. et al.: 2005b, Planetology in VO, Interop Meeting, Kyoto
- Berthier J., Vachier F., Lainey V., Thuillot W., Arlot J.-E., Fernique P., Ochsenbein F., Genova F.: 2005c, Implementing ephemerides facilities in the Vizier and Aladin tools, Virtual Observatories, Plate content digitization, Archive mining and Image sequence processing, International workshop, COST action 283, Sofia
- Berthier J., Vachier F., Lainey V., Thuillot W., Arlot W., Fernique P., Ochsenbein F., Genova F.: 2005d, A VOTable application: Solar System objects in the VO, Interop Meeting, Kyoto

- Berthier J., Vachier F., Thuillot W., Fernique P., Ochsenbein F., Genova F., Lainey V., Arlot J.-E.: 2006, SkyBoT, a new VO service to identify Solar System Objects *Astronomical Data Analysis Software and Systems XV 2005*, Madrid, El Escorial, *ASP Conference Series* **351**, 363
- Bowell E.: 2006, Orbits of Minor Planets and Comets, *VizieR On-line Data Catalog: B/astorb*, CDS, Originally published in: Lowell Observatory
- Padovani P., Allen M. G., Rosati P., Walton N.: 2004, Discovery of optically faint obscured quasars with Virtual Observatory tools, *Astron. Astrophys.* **425**, 545
- Simon, G.; Dubernet, M.L.; LeSidaner, P.; Abouharham, J.; Barache, C.; Berthier, J.; Boone, F.; Borsenberger, J.; Caillat, M.; Chilingarian, I.; Crovisier, J.; Dantel-Fort, M.; Debatz, B.; Dedieu, C.; Egret, D.; Gontier, A.M.; Guibert, J.; Guillaume, D.; Haignon, R.; Hennebelle, P.; Jegouzo, I.; Lainey, V.; LeBourlot, J.; LePetit, F.; Martin, J.M.; Micheneau, P.; Moreau, N.; Pelat, D.; Perault, M.; Prugniel, P.; Renie, C.; Roques, F.; Royer, F.; Schneider, J.; Tajahmady, F.; Theureau, G.; Thuillot, W.; Tran-Minh, F.; Vachier, F.; Vetois, J.; Viallefond, F.; Baillard, A.; Bertin, E.; Desert, J.M.; Ferlet, R.; Hebrard, G.; Magnard, F.; Malapert, J.-C.; Marquette, J.B.; Marmo, C.; Mellier, Y.; McCracken, H.; Sarkissian, A.; Didelon, P.; Lesquoy, E.: 2006, VO Paris federation, *Astronomical Data Analysis Software and Systems XV 2005*, Madrid, El Escorial, *ASP Conference Series* **351**, 394
- Thuillot W., Lainey V., Berthier J., Vachier F., Arlot J.-E.: 2005a, Virtual observatory and ephemerides of the Solar System objects, Virtual Observatories, Plate content digitization, Archive mining and Image sequence processing, International workshop, COST action 283, Sofia
- Thuillot W., Berthier J., Vachier F., Lainey V., Arlot J.-E.: 2005b, Virtual Observatory tools for Solar System bodies, American Astronomical Society, DPS meeting 37, 14.10
- Thuillot W., Berthier J., Vachier F., Lainey V., Arlot J.-E., Vaubaillon J., Colas F., Hestroffer D., Mouret S., Descamps P., Birlan M., Rocher P.: 2005c, Caractérisation orbitale et physique des astéroïdes, Ecole ASOV France, Obernai
- Thuillot W., Berthier J., Vachier F., Lainey V., Arlot J.-E.: 2005d, Projets OV de l'IMCCE pour les objets du système solaire, Colloque d'ouverture de l'Action spécifique OV France, Paris
- Thuillot W., Berthier J., Lainey V., Vachier F., Arlot J.-E.: 2006, VO tools for the Solar System Objects, Europlanet N2-N7 Workshop, ESAC, ESA VILSPA Center - Villafranca del Castillo, Madrid - Spain, 24-26 April.

La nouvelle Connaissance des Temps

J.-L. Simon, A. Fienga, M. Birlan, J. Normand, W. Thuillot

Un projet de rénovation de la *Connaissance des Temps* (CDT) avait été présenté au cours des Journées scientifiques 2003 de l'IMCCE (Thuillot et al., 2004). Ce projet répondait à la nécessité de revitaliser cette publication en fournissant annuellement aux utilisateurs des éphémérides de grande précision calculables sur micro-ordinateur, accompagnées des bases astronomiques nécessaires à leur compréhension et à leur utilisation. Cette refonte a été menée à bien et nous allons décrire la *Connaissance des Temps* telle qu'elle se présente à partir de l'édition 2006.

1. Organisation

Les responsables scientifiques de la publication ont été jusqu'à l'édition 2006 incluse J.-L. Simon et A. Fienga. À partir de l'édition 2007 les responsables sont A. Fienga et M. Birlan.

Un comité de rédaction a été créé. Il est actuellement composé de A. Fienga, M. Birlan, D. Gambis (SYRTE, observatoire de Paris), J.-L. Simon, W. Thuillot.

Le CDROM a été réalisé par J. Normand.

Enfin, en dehors des auteurs dont nous donnerons les noms dans la suite ont participé à ce travail :

- des collègues de l'IMCCE : J.-E. Arlot, S. Lemaître, V. Raoult et Ch. Ruatti
- G. Francou (SYRTE, observatoire de Paris) nous a aidé à aménager ses programmes de calcul d'éphémérides et P. Teyssandier (SYRTE, observatoire de Paris) nous a conseillé pour la traduction du chapitre sur les systèmes de référence relativistes.

2. La Connaissance des Temps à partir de l'édition 2006

La CDT présente maintenant deux volets.

2.1. La publication annuelle

Elle se divise elle-même en deux parties :

- l'introduction aux éphémérides, texte astronomique de 182 pages
- les éphémérides pour l'année (156 pages)

2.2. Les éphémérides électroniques

La publication annuelle est accompagnée d'un CDROM qui contient un logiciel de calculs astronomiques.

3. L'introduction aux éphémérides astronomiques

3.1 Contenu

L'introduction aux éphémérides comporte six chapitres :

- 1. Définitions et données astronomiques (auteurs : A. Bec-Borsenberger, D. Hestroffer, J.-L. Simon)

- 2. Échelles de Temps (F. Mignard)
- 3. Systèmes de Référence (A. Fienga, V.A. Brumberg, F. Arias, Z. Altamimi, N. Capitaine)
- 4. Rotation de la Terre (S. Lambert, J.-L. Simon, S. Mathews & V. Dehant, D. Gambis)
- 5. Changements de coordonnées (J.-L. Simon, A. Fienga & S. Lambert)
- 6. Explications liées aux éphémérides de la *Connaissance des Temps* (J.-L. Simon & J. Normand)

Les chapitres 1 et 2, la plus grande partie du chapitre 5 et une partie du chapitre 6 sont issus de l'ouvrage *Introduction aux éphémérides astronomiques (supplément explicatif à la Connaissance des Temps* (IEA) (Bureau des longitudes, 1997) avec des mises à jour mineures apportées par leurs auteurs.

3.2. Nouveautés (par rapport à l'IEA)

3.2.1. Systèmes de référence

Ce chapitre a été entièrement refait, il comprend :

- une introduction rédigée par A. Fienga,
- une section sur les systèmes de référence relativistes (V.A. Brumberg),
- une section sur les systèmes de référence dynamiques (A. Fienga),
- une section décrivant le système de référence céleste international ICRS (International Celestial Reference System) (F. Arias),
- une section décrivant le système international de référence terrestre ITRS ((International Terrestrial Reference System) (Z. Altamimi),
- une section traitant du passage du système de référence céleste géocentrique au système de référence terrestre (N. Capitaine).

3.2.2. Rotation de la Terre

Ce chapitre a, lui aussi, été refait. Il comprend :

- une introduction présentant les phénomènes physiques liés à la rotation de la Terre (S. Lambert),
- une présentation des nouveaux modèles de précession (J.-L. Simon),
- une présentation du modèle géophysique de nutation MHB2000, base de la nutation adoptée par l'UAI en 2000 (S. Mathews & V. Dehant),
- une section sur la détermination des paramètres d'orientation de la Terre (D. Gambis).

3.2.3. Changements de coordonnées

Ce chapitre contient une section nouvelle rédigée par A. Fienga et S. Lambert qui traite de l'application des résolutions de L'UAI 2001 aux changements de coordonnées. Les auteurs présentent deux algorithmes permettant le passage entre systèmes de référence céleste et terrestre :

- l'algorithme classique à partir des angles et matrices de rotation liées à l'équinoxe,
- l'algorithme se basant sur les nouveaux concepts définis par L'UAI en 2001, en particulier la nouvelle origine des ascensions droites, l'origine non-tournante ou origine céleste intermédiaire (CIO, Celestial Intermediate Origin).

3.2.4. Explications liées aux éphémérides de la CDT.

Ce chapitre a été remanié. Il contient, en particulier, une section sur l'utilisation des éphémérides tabulées (J.-L. Simon) et une autre sur l'utilisation des éphémérides électroniques (J. Normand).

4. Éphémérides pour l'année

À partir de l'édition 2006, les éphémérides pour l'année ne sont plus publiées sous forme de polynômes de Tchebychev ou de fonctions mixtes du temps mais sous forme de tables.

4.1. *Éphémérides autres que les éphémérides de satellites*

Les tables sont interpolables et publiées pour chaque jour de l'année sauf indication contraire. La CDT publie :

- le Temps sidéral et les nutations,
- l'angle de rotation de la Terre et l'équation des origines,
- les coordonnées du pôle céleste intermédiaire (CIP, Celestial Intermediate Pole) et l'angle s qui permet de positionner le CIO sur l'équateur,
- les éphémérides géocentriques du Soleil,
- les éphémérides géocentriques de la Lune (*de six heures en six heures*),
- les éphémérides des planètes principales,
- les éphémérides de Pluton, Cérès, Pallas, Junon et Vesta (*tous les quatre jours*).

Ces tables sont interpolables, c'est-à-dire qu'elles permettent de calculer des éphémérides précises. Néanmoins leur utilité première est de permettre à l'utilisateur de vérifier qu'il se sert correctement du logiciel du CDROM.

L'angle de rotation de la Terre, l'équation des origines, les coordonnées du CIP et l'angle s sont des coordonnées liées aux nouveaux concepts introduits par l'UAI en 2001. Elles sont introduites, pour la première fois, dans l'édition 2006 de la CDT.

4.2. *Éphémérides des satellites*

La CDT publie les coordonnées différentielles tangentielles des satellites X et Y , aux heures les plus proches des élongations est pour les satellites de Mars et aux heures les plus proches des plus grandes élongations est et ouest pour les satellites galiléens, les huit premiers satellites de Saturne et les cinq premiers satellites d'Uranus. Ces tables permettent, elles aussi, de vérifier l'utilisation correcte du logiciel du CDROM.

Notons que, depuis l'édition 2005, la CDT a introduit de nouvelles théories du mouvement des satellites de Saturne : la théorie TASS1.6 (Vienne et Duriez, 1995) pour Mimas, Encelade, Téthys, Dioné, Rhéa, Titan et Japet, et la théorie de Duriez et Vienne (1997) pour Hypérior.

5. Les éphémérides électroniques

La publication est accompagnée d'un CDROM contenant un logiciel qui effectue un certain nombre de calculs astronomiques.

5.1. *Éphémérides de la CDT*

Le logiciel calcule toutes les éphémérides publiées dans la CDT. Le temps sidéral, l'angle de rotation de la Terre et l'équation des origines sont calculés à partir de leurs formules de définition. Les autres coordonnées sont calculées à partir de représentations analogues à celles utilisées dans les CDT antérieures :

- polynômes de Tchebychev pour les nutations, les coordonnées du CIP et les coordonnées du Soleil, de la Lune et des planètes;
- fonctions mixtes du temps pour les coordonnées des satellites.

Pour les coordonnées représentées en polynômes de Tchebychev, nous avons cherché à garder toute la précision des sources; la précision de représentation est donc bien plus grande que dans les anciennes CDT.

C'est, bien entendu, à partir de ces diverses représentations qu'ont été calculées les coordonnées publiées dans la publication annuelle.

5.2. *Autres calculs*

Le logiciel permet aussi de calculer, en chaque point du globe :

- les coordonnées horizontales, azimut et hauteur, du Soleil, de la Lune et des planètes;
- les levers, couchers, passages au méridien de ces mêmes corps.

5.3. Autres possibilités

Outre le simple calcul d'éphémérides, le logiciel propose :

- une visualisation des coefficients utilisés pour représenter les coordonnées;
- les prédictions des phénomènes des satellites galiléens.

6. Évolution de la CDT

Les CDT ultérieures auront la même forme que l'édition 2006. Néanmoins de nombreuses évolutions sont à prévoir. On peut citer, en particulier :

- l'introduction de nouvelles théories du mouvement du Soleil, de la Lune, des planètes et des satellites;
- la possibilité, en accord avec l'éditeur, de rédiger, chaque année, un chapitre ou une section présentant les nouveautés de l'année;
- l'édition de la CDT sous forme d'e-book;
- en ce qui concerne le CDROM :
 - remplacement, pour les coordonnées des satellites, des fonctions mixtes par des polynômes de Tchébychev, plus à même de représenter avec une grande précision les nouvelles théories satellitaires;
 - introduction d'autres coordonnées ou d'autres corps que ceux figurant dans la publication annuelle;
 - introduction de tables fixes (éléments orbitaux des satellites, par exemple)
- enfin, à plus long terme, il sera bon d'entreprendre la rédaction d'une nouvelle édition de l'*Introduction aux éphémérides astronomiques*, si possible en français et en anglais.

Bibliographie

- Bureau des longitudes : 1997, *Introduction aux éphémérides astronomiques (supplément explicatif à la Connaissance des Temps)*. Simon, J.-L., Chapront-Touzé, M., Morando, B., Thuillot, W. eds, EDP Sciences, Les Ulis.
- Bureau des longitudes, Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides : 2005, *Éphémérides astronomiques (Connaissance des Temps) 2006*, EDP Sciences, Les Ulis.
- Duriez L., Vienne A.: 1997, Theory of motion and ephemerides of Hyperion, *Astron. Astrophys.* **324**, 366.
- Thuillot, W., Simon, J.-L., Fienga, A. : 2004, *Journées scientifiques 2003 de l'IMCCE, Note Scientifique et Technique de l'Institut de mécanique céleste* S081, 111.
- Vienne A., Duriez L. : 1995, TASS1.6: Ephemerides of the major Saturnian satellites, *Astron. Astrophys.* **297**, 588.

La détermination de masses des astéroïdes avec la mission Gaia

Serge Mouret, Daniel Hestroffer, François Mignard¹

¹ OCA/Cassiopee Boulevard de l'Observatoire, 06304 NICE

1. Introduction

Le satellite Gaia est une mission astrométrique de l'Agence spatiale européenne (ESA) devant observer plus d'un milliard d'objets avec une précision inégalée jusqu'à la magnitude 20. Il sera lancé en 2011 pour une durée de 5 ans. Parmi les objets observés du système solaire, Gaia déterminera les positions d'environ 300 000 astéroïdes avec une extrême précision: pour des magnitudes situées entre 10 et 15, elle sera de 310 μ as et diminuera jusqu'à 1,6 mas à magnitude 20. A partir des positions de certains astéroïdes, nous serons en mesure de déterminer la masse des astéroïdes les plus massifs. **L'intérêt des masses** est grand et touche de nombreux domaines de l'astronomie. Leur détermination permettra d'améliorer grandement la modélisation de la dynamique d'objets du système solaire et notre connaissance de la physique des astéroïdes. Nous calculerons ces masses par l'analyse des perturbations orbitales au cours de passages proches entre un astéroïde massif, le perturbateur, et plusieurs astéroïdes plus petits, appelés astéroïdes cibles. Un travail préparatoire sera nécessaire afin de sélectionner les rencontres entre astéroïdes qui présenteront une signature gravitationnelle suffisante pour permettre la détermination de masses. Il s'agira de définir des **critères d'efficacité des passages proches** entre astéroïdes. Ensuite, nous appliquerons notre méthode numérique globale de **calcul des masses** des astéroïdes massifs, dont le but sera de traiter simultanément tous les astéroïdes perturbateurs et cibles.

2. Intérêt des masses

D'un point de vue dynamique, la connaissance des masses des astéroïdes les plus massifs permettront d'obtenir des orbites à long terme très précises des petits astéroïdes cibles. Elles permettront aussi d'améliorer les éphémérides planétaires, sachant qu'actuellement le facteur limitant de leur précision est l'incertitude qui règne sur l'exactitude des masses des plus gros. Mars, planète la plus sensible à leurs perturbations, sera la principale bénéficiaire de ces déterminations de masses [1]. D'autre part, elles rendront possible d'une manière indirecte, la mesure avec plus d'exactitude de certains paramètres du système solaire, comme l'aplatissement du Soleil et des paramètres post-newtonien comme β .

D'un point de vue physique, l'estimation des masses associée aux dimensions des astéroïdes nous livrera leur densité volumique. Cette densité approximative comprend une partie du vide qui compose l'astéroïde et que désigne la notion de porosité. Actuellement, son calcul impose la recherche des météorites qui s'approchent le plus par analyse spectrale de l'astéroïde étudié. La porosité s'exprime alors par le rapport entre la densité de grains (sans aucun vide) du météorite et la densité volumique obtenue pour l'astéroïde [2]. La porosité est un élément clé pour connaître leur structure interne, comprendre leur origine ainsi que leur processus de formation.

De plus les différentes densités que nous déterminerons mettront peut-être en évidence une relation entre densité et classe taxonomique, et éclaireront la question sur l'existence d'une relation génétique entre certaines classes de météorites et groupes d'astéroïdes [3].

3. Critère d'efficacité des passages proches

La définition du critère d'efficacité des rencontres entre astéroïdes dépend de la représentation choisie pour le phénomène. Soit on considère que lors du rendez-vous l'attraction du soleil est négligeable, alors on se place dans un problème des deux corps avec une approche impulsionnelle; soit on prend en compte les perturbations du soleil, et dans ce cas on considère un problème à trois corps sous certaines hypothèses simplificatrices concernant les masses des corps et leurs distances mutuelles.

L'approche impulsienne:

La trajectoire de l'astéroïde perturbé dans le référentiel du perturbateur est assimilée à une hyperbole. A partir de là, il est possible de définir différentes quantités qui exprimeront l'ampleur de la perturbation. La plus connue est l'angle de déflexion ϕ (figure 1) dont l'expression est:

$$\sin \frac{\phi}{2} \simeq \frac{1}{1 + \frac{r_{min} v_0^2}{GM}}$$

avec r_{min} la distance minimale entre les deux astéroïdes lors du passage proche, v_0 la vitesse relative à cet instant, G la constante de gravitation et M la masse du perturbateur.

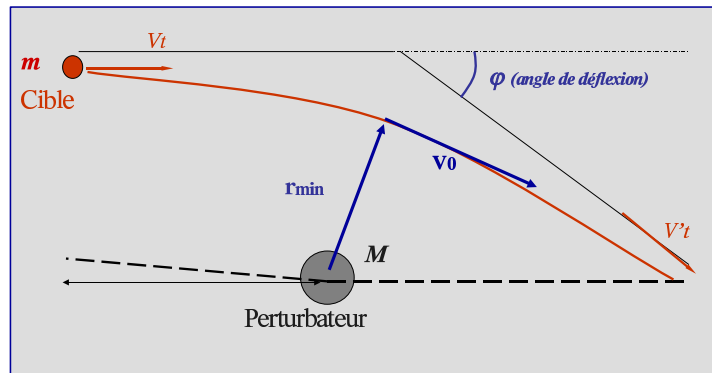


Figure 1: Orbite hyperbolique de l'astéroïde cible m entrant dans le champ gravitationnel du perturbateur M

Beaucoup d'autres expressions existent pour représenter la perturbation sous cette approche. Citons comme exemple la variation de vitesse de l'astéroïde perturbé ou l'énergie efficace [4].

Cette approche à deux corps a ses limites dans certains cas de passages proches. M. Henon l'a montré lors d'un travail sur les anneaux de Saturne, dans le cas où la distance entre deux particules restait grande (paramètre d'impact large) durant toute la rencontre [5]. La représentation par le problème des trois corps devient par conséquent indispensable.

Exemple d'un problème à trois corps:

Le problème de Hill en est un exemple. On considère trois corps de masse M , m_p , m_c orbitant dans un même plan tels que m_p , m_c soient négligeables devant M . Nous pouvons assimiler M au soleil, m_p à l'astéroïde perturbateur et m_c à l'astéroïde cible. De plus la distance qui sépare les corps de masse m_p , m_c est négligeable devant celle qui existe entre le corps de masse M et le centre de masse de (m_p, m_c) . On considère un repère (ξ, η) tournant, centré sur le centre de masse de (m_p, m_c) . De là, M. Henon et J.M. Petit donnèrent des solutions analytiques pour les coordonnées (ξ, η) , et dans le cas du paramètre d'impact large, les variations de constantes avant et après la rencontre intervenant dans l'expression des coordonnées (ξ, η) [6]. Citons aussi P. Goldreich et S. Tremaine [7] qui donnèrent l'expression de la variation du moment angulaire de l'astéroïde cible.

Il nous faudra tester tous ces critères d'efficacité des passages proches afin de sélectionner les rendez-vous les plus intéressants entre perturbateurs et perturbés pour l'évaluation des masses.

4. Le calcul des masses

Le calcul des masses consiste à comparer les positions observées aux positions calculées aux mêmes dates. On fait l'hypothèse que ces deux trajectoires dépendent de mêmes paramètres (position-vitesse au temps initial $\mathbf{x}_0 = (x_0, y_0, z_0)$, $\dot{\mathbf{x}}_0 = (\dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{z}_0)$ et la masse du perturbateur m_p) mais avec des valeurs différentes. On note $\mathbf{u}' = (\mathbf{x}'_0, \dot{\mathbf{x}}'_0, m'_p)$ ces valeurs aux positions observées, et $\mathbf{u} = (\mathbf{x}_0, \dot{\mathbf{x}}_0, m_p)$ aux positions calculées. Ensuite on fait l'hypothèse qu'il existe une relation linéaire entre les $\mathbf{O}-\mathbf{C}$, différence entre les positions observées et les positions calculées, et $\Delta\mathbf{U} = \mathbf{u}' - \mathbf{u}$, différence entre les valeurs des paramètres à ajuster:

$$\mathbf{O} - \mathbf{C} = \mathbf{A} \Delta\mathbf{U}$$

où \mathbf{A} est la matrice aux dérivées partielles. Cette matrice donne les variations des positions $\mathbf{r} = (x, y, z)$ en fonction des paramètres ajustable \mathbf{u} . On peut la calculer analytiquement sous certaines hypothèses ou numériquement. Dans notre cas, nous avons utilisé les équations variationnelles, qui consistent à intégrer numériquement les équations régissant les variations de \mathbf{r} en fonction de \mathbf{u} .

$$\frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \mathbf{u}} \right) = \frac{\partial \ddot{\mathbf{r}}}{\partial \mathbf{u}} = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{u}}$$

où \mathbf{F} est la fonction de force de l'équation du mouvement de l'astéroïde: $\ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{F}$. Pour le moment, les simulations intègrent environ 20 000 astéroïdes dont une centaine de perturbateurs.

Le satellite Gaia ne sera lancé qu'en 2011, et par conséquent il nous est impossible de déterminer la valeur des paramètres \mathbf{u} . En revanche nous pouvons donner la précision avec laquelle on pourra les calculer, sachant que celle des positions que Gaia permettra d'obtenir est connue. Nous avons réalisé un exemple avec la masse de Ceres à partir de passages proches entre Ceres et 19 astéroïdes qu'il perturbera et que Gaia observera. La précision attendue pour le calcul de sa masse était de l'ordre de 0.01 %, soit cent fois meilleure que les précisions au sol actuelles.

5. Perspectives

D'autres critères pour quantifier l'effet des passages proches entre astéroïdes sont à rechercher. Il faudra ensuite les relier aux simulations permettant le calcul des masses afin de connaître les plus efficaces. Il sera aussi intéressant d'augmenter le nombre d'astéroïdes potentiellement perturbables jusqu'à 300 000, ce qui rendra indispensable l'utilisation de la parallélisation du code de calcul. Enfin, l'étude d'autres paramètres comme l'aplatissement dynamique du soleil J2 ou des paramètres relativistes dans la représentation post-newtonienne est en cours d'exploration et semble avoir son intérêt.

References

- [1] E.M.Jr Standish and A. Fienga. Accuracy limit of modern ephemerides imposed by the uncertainties in asteroid masses. *A&A*, 384,322, march 2002.
- [2] D. T. Britt; D. Yeomans; K. Housen; G. Consolmagno Asteroid Density, Porosity, and Structure *Asteroids III*, W. F. Bottke Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, and R. P. Binzel (eds), University of Arizona Press, Tucson, p.485-500
- [3] V. Zappala and A. Cellino The impact of GAIA in our knowledge of asteroids. *GAIA: a european space project*, EAS Publications Series, Volume 2, pp.343-349 2001 Les Houches, France. Edited by O. Bienayme' and C. Turon. EDP Sciences, 2002
- [4] M Carpino and Z. Knezevic Determination of asteroid masses from mutual close approaches
- [5] M. Henon A simple model of Saturn's rings revisited *CNES Planetary Rings* p.363-384 (SEE N85-26473 15-91)
- [6] M. Henon; J.-M. Petit Series expansion for encounter-type solutions of Hill's problem *Celestial Mechanics* (ISSN 0008-8714), vol. 38, Jan. 1986, p. 67-100.
- [7] Goldreich, P.; Tremaine, S. The dynamics of planetary rings *A&A*, Volume 20. (A83-12176 02-90) Palo Alto, CA, Annual Reviews, Inc., 1982, p. 249-283.

Propagation des erreurs dans les éphémérides de satellites (et d'astéroïdes)

Josselin Desmars, Jean-Eudes Arlot, Alain Vienne

1. Introduction

Gaia est une mission astrométrique qui permettra d'observer un grand nombre d'objets du ciel à une précision jamais atteinte (de l'ordre d'une dizaine de microarcsecondes (μas) pour les étoiles). Parmi ces objets, figurent les satellites planétaires. Comme Gaia observera des objets jusqu'à la magnitude 20, la plupart d'entre eux seront observables. On disposera ainsi d'environ 50 observations pour chaque satellite sur la durée de la mission, 5 ans [2]. La précision dépendra essentiellement de la taille du satellite observé et de sa magnitude. Globalement, elle sera donc comprise entre 0.1 et 1 milliarcsecondes (mas).

Avec une telle précision, il est intéressant de savoir si Gaia pourra remplacer les observations déjà existantes et de manière plus générale, quel pourra être l'apport de la mission pour l'étude dynamique des satellites. C'est ce que nous verrons dans un premier temps. Pour pouvoir étudier la propagation d'erreurs dans les éphémérides de manière plus générale, nous présenterons un exemple de ce qui est fait pour les astéroïdes. Enfin, nous exposerons brièvement le travail en cours.

2. Un premier exemple : les satellites galiléens observés par Gaia

2.1 Principe général

Nous avons étudié les satellites galiléens et utilisé la théorie de Lainey [1] qui donne les positions de ces satellites à un temps donné. Nous avons simulé à partir de cette théorie, 50 observations "Gaia" bruitées et équiréparties sur 5 ans (cf. 2.2). Ensuite, l'ajustement de la théorie à ces observations a été réalisé par la méthode des moindres carrés puis nous avons comparé les positions données par la théorie initiale (L1) et la théorie ajustée à ces observations (L1*) sur une durée d'un siècle.

2.2 Simulations des observations

Pour simuler des observations Gaia, nous avons calculé les positions des satellites à des temps donnés puis nous avons transformé ces positions en coordonnées absolues (α, δ). Sur ces coordonnées, nous introduisons un bruit gaussien de variance σ^2 . Dans un premier temps, nous avons supposé le bruit non biaisé (*ie* de moyenne $\mu = 0$) puis ensuite, nous avons introduit la phase géométrique ce qui a pour conséquence de produire un biais. En effet, l'effet de phase produit un écart entre le photocentre (qui est observé) et le centre de masse (qui est calculé). Nous avons pu calculer que l'écart maximal était atteint pour Ganymède et atteignait 8 mas.

2.3 Quelques résultats

La figure 1 donne un exemple de résultats que l'on obtient. Nous avons représenté la différence entre L1 et L1* sur une durée de 100 ans pour un bruit gaussien non biaisé. Ainsi, pour une précision initiale de 1 mas, la différence atteint au bout d'un siècle 40 km soit un peu plus de 10 mas. Pour une précision de 0.1 mas, l'écart atteint 3 km soit 1 mas.

Lorsqu'on introduit l'effet de phase (et donc qu'on biaise les observations) les résultats sont différents (Fig.2). Ainsi, pour une précision initiale de 1 mas, l'écart atteint cette fois 50 à 60 km (soit 20 mas) après un siècle. Pour une précision de 0.1 mas, le résultat est encore plus différent puisque cet écart atteint 35 à 40 km contre seulement 3 km dans le cas non biaisé. Ce résultat montre que le biais détruit en partie la précision que l'on peut avoir après un siècle même pour des observations au départ relativement précises.

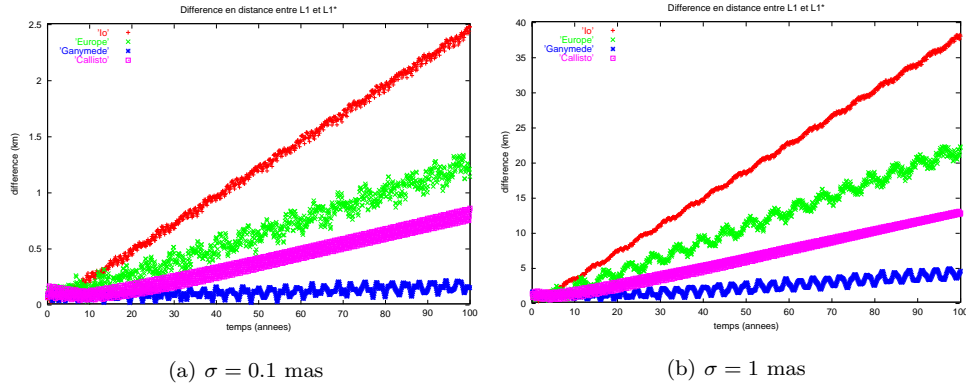


FIG. 1 – Différence entre L1 et L1* sur 100 ans pour différentes valeurs de σ et pour $\mu = 0$

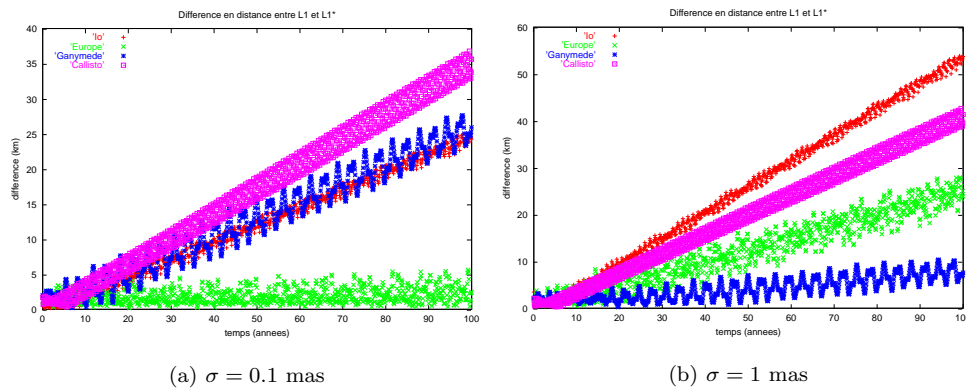


FIG. 2 – Différence entre L1 et L1* sur 100 ans pour différentes valeurs de σ et tenant compte de la phase

2.4 Première conclusion

Afin de comparer les résultats obtenus avec des observations terrestres, nous avons réalisé de la même manière, une simulation d'un siècle d'observations terrestres à une précision de $0.1''$. Cette simulation donne un écart de 35 mas environ après un siècle. Avec Gaia, nous obtenons une précision comprise entre 10 et 30 mas au bout d'un siècle.

La meilleure précision est obtenue actuellement grâce aux phénomènes mutuels (20 mas) mais elle pourrait être théoriquement bien meilleure. En effet, une étude photométrique permet de mieux déterminer la distance photocentre-centre de masse et Gaia réalisera également de la photométrie. Ainsi, avec une meilleure détermination de cette distance, nous pourrions mieux réduire ces phénomènes et ainsi gagner en précision sur la théorie.

3. Propagation des erreurs : cas des astéroïdes

Nous savons que trois observations astrométriques permettent de déterminer six éléments orbitaux et donc de définir une orbite. Seulement, des erreurs sur les observations peuvent donner des orbites très différentes. Pour prendre en compte cela, l'idée est de faire une étude statistique des orbites. Ce que nous allons présenter maintenant en est un exemple et est issu principalement de Virtanen *et al* [3].

À partir de différents jeux d'observations, on génère un échantillon d'orbites. Pour chacune de ces orbites, on calcule la position de l'astéroïde à un instant t , ce qui détermine une région de l'espace où se situe l'astéroïde à cet instant.

3.1 Densité de probabilité des éléments orbitaux

Pour expliquer de manière plus détaillée, nous avons N observations que nous notons sous forme vectorielle $:\boldsymbol{\psi} = (\alpha_1, \delta_1, \dots, \alpha_N, \delta_N)$ réalisées à des temps (t_1, \dots, t_N) . À chaque date d'observations, on calcule les positions théoriques, que l'on note $\boldsymbol{\Psi}(\mathbf{P}, t)$, à partir des éléments orbitaux $\mathbf{P} = (a, e, i, \Omega, \omega, M)$. En notant $\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon_1^{(\alpha)}, \varepsilon_1^{(\delta)}, \dots, \varepsilon_N^{(\alpha)}, \varepsilon_N^{(\delta)})$ le résidu, on a ainsi la relation :

$$\boldsymbol{\Psi}(\mathbf{P}, t) + \boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\psi}$$

On cherche à déterminer la densité de probabilité des éléments \mathbf{P} . Cette probabilité est proportionnelle à la densité de probabilité que l'on a sur l'erreur. Or l'idée est de contraindre cette probabilité pour restreindre l'échantillon d'orbites créé. Pour cela, on utilise la formulation bayésienne suivante qui permet de relier la probabilité *a posteriori* ($p_{pos}(\mathbf{P})$) avec la probabilité *a priori* ($p_{pre}(\mathbf{P})$) :

$$p_{pos}(\mathbf{P}) \propto p_{pre}(\mathbf{P}) p_{\varepsilon}(\boldsymbol{\psi} - \boldsymbol{\Psi}(\mathbf{P}))$$

La figure 3 montre le genre d'information *a priori* dont on peut disposer pour les astéroïdes. Elle illustre la distribution suivant différents paramètres (demi-grand axe, excentricité, inclinaison et magnitude) pour 25612 astéroïdes connus.

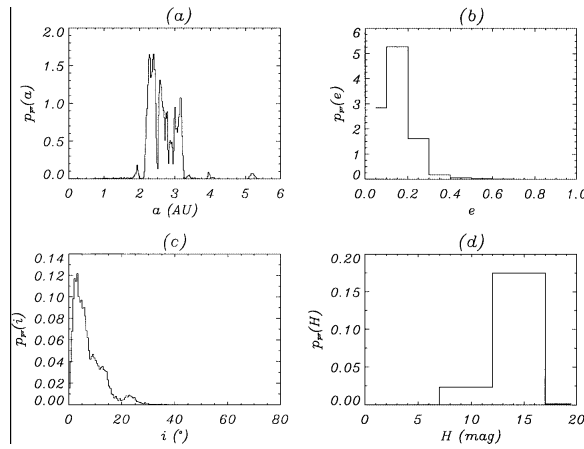


FIG. 3 – Distribution suivant a, e, i, H pour 25612 astéroïdes connus

3.2 Méthode

Dans un premier temps, on cherche une orbite préliminaire par moindres carrés. Si les résidus obtenus par cette méthode ne sont pas trop grands alors on conserve cette orbite. Si les résidus sont trop grands alors on ne dispose pas d'orbite préliminaire et c'est dans ce cas que l'on pourra éventuellement utiliser de l'information *a priori* pour générer notre échantillon d'orbites. Par la suite, les auteurs utilisent une méthode de détermination d'orbites grâce à deux observations.

La méthode générale pour créer cet échantillon est synthétisée ci-après :

1. Choix du modèle dynamique (2 corps ou N corps)
2. Choix entre :
 - méthode restreinte (orbite préliminaire disponible) \Rightarrow 3
 - méthode non restreinte (orbite préliminaire non disponible)
 - information *a priori*? - non
 - oui pour a, e, i, H
3. Définitions des écarts-type sur les erreurs en ascension droite (σ_{α}), en déclinaison (σ_{δ})
4. Définitions des intervalles de variation de la distance (objet-observateur) ($\rho_+, \rho_-, \Delta\rho$), de l'ascension droite ($\Delta\alpha$) et de la déclinaison ($\Delta\delta$)
5. Sélection aléatoire de deux observations (α_A, δ_A) et (α_B, δ_B) .

6. Introduction d'une variation aléatoire uniforme $(r_1, \dots, r_6) \in [0, 1]$
 - variation en α et δ
 - $\alpha_{A,B} \leftarrow \alpha_{A,B} + (1 - 2r_{1,3})\Delta\alpha$
 - $\delta_{A,B} \leftarrow \delta_{A,B} + (1 - 2r_{2,4})\Delta\delta$
 - variation en distance
 - méthode non restreinte : $\rho_A = \rho_- + r_5(\rho_+ - \rho_-)$ et $\rho_B = \rho_A + (r_6 - 0.5)\Delta\rho$
 - méthode restreinte : $\rho_{A,B} = \rho_{A,B}^{(0)} + (r_{5,6} - 0.5)\Delta\rho$
 - calcul des positions r_A et r_B en coordonnées cartésiennes
7. Calcul des éléments orbitaux, ascension droite et déclinaison pour toutes les dates d'observations
→ si l'ajustement aux observations est inacceptable alors \Rightarrow 5
8. Stockage de l'orbite (paramètres liés à l'orbite) ainsi créée.
Pour plus d'orbites \Rightarrow 5
Si les intervalles de variation ont besoin d'être ajustés alors \Rightarrow 4
9. Calcul de la densité de probabilité finale

3.3 Résultats

Nous présentons ici deux exemples de résultats. Pour le premier, Albert, une orbite préliminaire est disponible. La figure ?? montre la distribution dans l'espace des phases de 2618 orbites générées par la méthode précédente. Le signe (+) sur la figure indique la position de l'astéroïde sur l'orbite préliminaire et le signe (\times), sa position réelle. Cette dernière se trouve presque toujours dans le nuage de points, ce qui tend à valider la méthode.

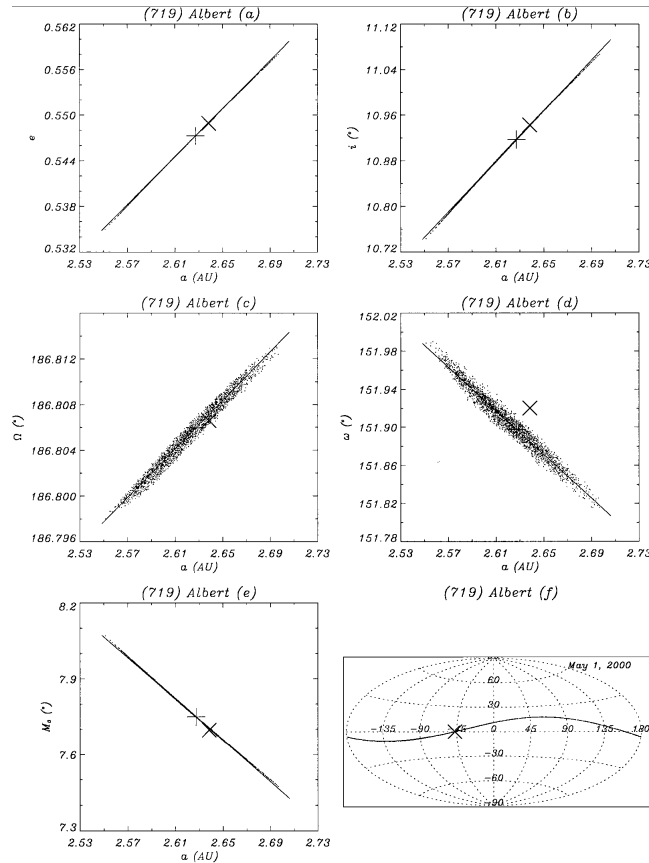


FIG. 4 – Distributions obtenues pour Albert

Dans le deuxième exemple (1990RM₁₈), l'orbite préliminaire n'est pas disponible. L'information *a priori* va donc pouvoir être utilisée. Sur la figure ??, sont représentées les différentes distributions pour

6252 orbites créées. Cette fois, les points représentent les positions pour les orbites créées sans information *a priori* et les signes (+) les positions pour les orbites créées avec information *a priori*. On constate que la distribution est contrainte par cette information.

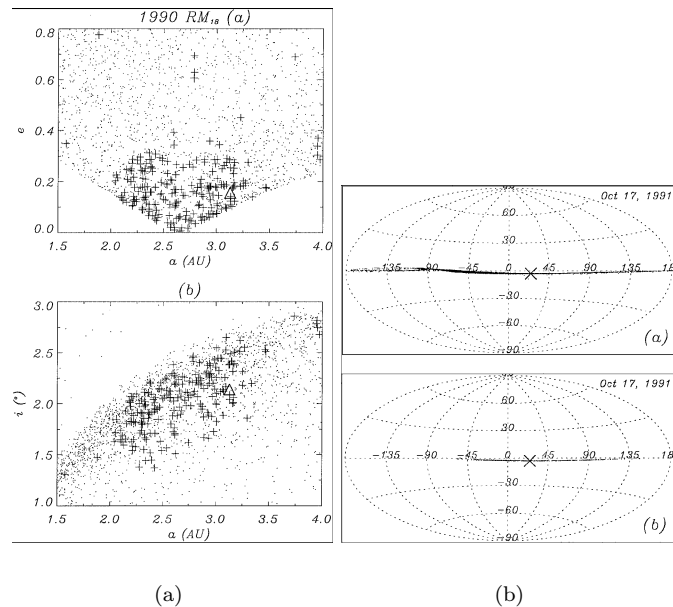


FIG. 5 – Distributions obtenues pour 1990RM₁₈

4. Travail en cours et perspectives

Le travail à suivre consiste à appliquer une méthode similaire aux astéroïdes mais pour les satellites planétaires. Par exemple, on pourra appliquer une méthode comme pour ce qui a été fait pour Gaia mais cette fois avec de véritables observations terrestres et comparer les positions obtenues avec des observations récentes.

Pour cela, je vais tester différents modèles dynamiques par exemple pour Saturne, TASS et le modèle de Lainey appliqué aux satellites de Saturne. L'idée étant de déterminer des quantificateurs, à savoir une famille de paramètres qui expriment la divergence (à partir d'un modèle et/ou d'un échantillonnage d'observations) et des critères de qualité des éphémérides, comme par exemple, un temps de validité.

Références

- [1] V. LAINEY *Théorie dynamique des satellites galiléens*. Thèse de Doctorat, 2002
- [2] P. TANGA, F. MIGNARD *Observing the natural satellites of Solar System bodies with GAIA*. Proceedings of the Symposium "The Three-Dimensional Universe with Gaia", 4-7 October 2004, Paris, France, ESA SP-576, p313-316, janvier 2005
- [3] J. VIRTANEN, K. MUINONEN and E. BOWELL *Statistical Ranging of Asteroid Orbits*. Icarus **154**, p412-431, 2001

Recherche effective de solutions quasipériodiques dans des systèmes hamiltoniens

Guillaume Morin

1. Motivation

1.1 Systèmes hamiltoniens

Soit n un entier naturel fixé valant au moins 1. On notera \mathbb{T} le tore standard de dimension 1 $\mathbb{R}/2\pi\mathbb{Z}$ et \mathbb{T}^n le tore de dimension n $\mathbb{R}^n/2\pi\mathbb{Z}^n$. On considère un *hamiltonien autonome* H , fonction des variables (p, q) de $\mathbb{R}^n \times \mathbb{T}^n$ à valeurs dans \mathbb{R} . Les *équations de Hamilton* sont définies par le système suivant :

$$\begin{cases} \dot{p} = -\frac{\partial H(p, q)}{\partial q} \\ \dot{q} = \frac{\partial H(p, q)}{\partial p} \end{cases} \quad (1)$$

Rappelons que le théorème de Cauchy-Lipschitz assure, pour une condition initiale donnée (p_0, q_0) (à $t = 0$) l'existence et l'unicité d'une solution maximale de (1).

Définition 1. Un *ensemble invariant* \mathcal{I} vérifie : pour toute condition initiale (p_0, q_0) sur \mathcal{I} , la solution de (1) passant par (p_0, q_0) vérifie, pour tout t , $(p(t), q(t))$ appartient à \mathcal{I} .

Dans le cas où H est intégrable, le théorème d'Arnold-Liouville assure que les variétés invariantes sont généralement des tores, sur lesquels la dynamique est quasipériodique. Il dit même plus : l'espace des phases est complètement rempli par des variétés invariantes. Ceci nous amène à la définition suivante :

Définition 2. Soit ω un vecteur de \mathbb{R}^n . Une solution $(p(t), q(t))$ de (1) est dite *quasipériodique* de fréquence ω si elle est de la forme :

$$\begin{cases} p(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}^n} a_k e^{ik \cdot \omega t} \\ q(t) = \omega t + \sum_{k \in \mathbb{Z}^n} b_k e^{ik \cdot \omega t} \end{cases}$$

où le point \cdot représente le produit scalaire euclidien usuel.

On peut remarquer que si H est intégrable et si (p, q) sont des coordonnées action-angle, $H(p, q) = H_0(p)$ et (1) se réécrit :

$$\begin{cases} \dot{p} = 0 \\ \dot{q} = \frac{\partial H_0(p)}{\partial p} \end{cases}$$

Donc p est constant, égal à p_0 et si on note ω le vecteur $\frac{\partial H_0(p_0)}{\partial p}$ de \mathbb{R}^n , on a une solution quasipériodique de fréquence ω :

$$\begin{cases} p(t) = p_0 \\ q(t) = \omega t + q_0 \end{cases}$$

De plus, l'ensemble $\{p_0\} \times \mathbb{T}^n$ est un tore invariant, et toute solution commençant sur ce tore est quasipériodique de fréquence ω . Généralisons : si l'application fréquence $p \mapsto \frac{\partial H(p, q)}{\partial p}$ est inversible (au moins localement), c'est-à-dire si la matrice $\frac{\partial^2 H(p, q)}{\partial p^2}$ est inversible il existe une bijection entre fréquences et tores invariants sur lesquels la dynamique est quasipériodique.

1.2 Les idées de Kolmogorov

À la suite de Poincaré, Kolmogorov va chercher à mener une étude géométrique des systèmes différentiels hamiltoniens. Le but n'est plus d'étudier une solution donnée par un problème de Cauchy (*i.e.* par une condition initiale) mais un ensemble de solutions ; cet ensemble sera donc nécessairement invariant. De plus, on ne choisit pas n'importe lequel, mais, comme l'on se place dans une étude perturbative (« près » d'un système intégrable), on cherche un tore invariant sur lequel la dynamique est prescrite, à savoir quasipériodique de fréquence ω . L'un des résultats les plus fameux de Kolmogorov est le théorème sur les tores invariants, complété plus tard par Arnold et Moser (on parle aujourd'hui de théorie KAM) : *lorsqu'un système hamiltonien intégrable, vérifiant une certaine condition ouverte de dégénérescence, est perturbé, les tores invariants de fréquence ω diophantienne du système intégrable subsistent (ce sont encore des tores invariants de fréquence ω)*. Le théorème énoncé dans tous ses détails donne une valeur explicite de la « taille » de la perturbation pour laquelle les tores invariants diophantiens sont conservés ; or on observe numériquement que même avec des perturbations de taille plus grande que celle donnée par le théorème, des tores diophantiens semblent encore subsister.

C'est donc la raison pour laquelle on essaye de mettre au point une manière d'estimer ces écarts au théorème. La stratégie est la suivante :

- partir de conditions initiales, lesquelles déterminent une solution de (1) calculée *numériquement*, par un intégrateur ;
- faire l'analyse en fréquences de cette solution, et déterminer la fréquence ω prépondérante ;
- chercher alors *par calcul formel* le(s) tore(s) invariant(s) correspondant à cette fréquence ;
- évaluer la distance entre les conditions initiales de la première étape et ce tore invariant, pour en déduire une éventuelle « extension » du théorème de Kolmogorov.

Bien évidemment, l'idéal serait de pouvoir appliquer ceci au problème des N corps. Pour l'instant, on se limite à des exemples simples et notoirement intégrables tels que le pendule simple. La partie que l'on est ici en mesure de présenter (bien qu'incomplète...) est la recherche formelle de tores invariants sur lesquels les solutions sont quasipériodiques de fréquence ω prescrite.

Nous avons trois méthodes à notre disposition : une méthode d'itération, une méthode de Newton, et une méthode variationnelle.

2. Les méthodes utilisées

L'outil principal de cette section est le logiciel de calcul formel `trip` développé à l'IMCCE par Mickaël Gastineau et Jacques Laskar.

2.1 Méthode d'itération

Le principe en est simple : une fois fixée une condition initiale (*i.e.* un couple de fonctions (p_0, q_0)), on définit la suite de fonctions (p_k, q_k) par la formule de récurrence suivante :

$$\begin{cases} \dot{p}_{k+1} = -\frac{\partial H}{\partial q}(p_k, q_k) \\ \dot{q}_{k+1} = \frac{\partial H}{\partial p}(p_k, q_k) \end{cases}.$$

Chaque étape consiste simplement à intégrer par rapport au temps le champ hamiltonien pris sur les fonctions précédentes. L'avantage d'une telle méthode est sa simplicité, notamment le fait qu'elle soit possible pour toute équation différentielle résolue, et sa généralisation simple quelle que soit la dimension.

Cependant, même en dimension 1 et pour des systèmes intégrables, on rencontre des problèmes de convergence. Le cas du pendule simple, notoirement intégrable, correspond à la récurrence suivante :

$$\begin{cases} \ddot{u}_{k+1} = -a \sin(\theta + u_k(\theta)) \\ \langle u \rangle = \langle \dot{u} \rangle = 0 \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases}$$

où a est un paramètre réel correspondant à la « physique » du problème. Dès que a est plus grand que 1,2 il n'y a plus convergence cependant... Cette méthode atteint donc rapidement ses limites.

2.2 Méthode de Newton

Cette méthode est basée sur l'article de Salamon et Zehnder [3]. Commençons par la présenter en dimension 1, c'est-à-dire pour un système à 1 degré de liberté, par exemple le pendule simple. On peut écrire l'équation d'évolution du pendule simple comme :

$$u''(\theta) + f(\theta + u(\theta)) = 0. \quad (2)$$

On a remplacé la recherche de la fonction inconnue q par la recherche de la fonction u , où on a écrit $q(t) = \omega t + u(\omega t)$.

Supposons que v est une solution approchée à l'ordre ε de (2) : $v''(\theta) + f(\theta + v(\theta)) = \varepsilon(\theta)$. On cherche alors $w(\theta)$ telle que $u = v + w$ soit solution de (2) à l'ordre ε^2 . L'astuce (sorte de variation de la constante) est ici de chercher w sous la forme $(1 + v')z$: on obtient alors une équation différentielle (en supprimant les termes d'ordre ε^3) sur z qu'on peut résoudre par quadratures.

Cette méthode donne une convergence quadratique, ce qui représente un certain avantage. Cependant, il est nécessaire de choisir de bonnes conditions initiales. Enfin, inconvénient majeur, la généralisation en dimension supérieure, en suivant toujours [3], ne se fait pas sans douleur, et utilise le lemme suivant :

Lemme 1. Si $w = Mz$ avec $M = I_n + v_\theta$, où v_θ est la jacobienne de v , et z solution de $\mathcal{L}_\omega({}^t M M \mathcal{L}_\omega z) = -{}^t M e$, alors $v_1 = v + w$ vérifie :

$$\mathcal{L}_\omega^2 v_1 + f_x(\theta + v_1) = e_1 = O(|e|^2),$$

où \mathcal{L}_ω est l'opérateur $\sum_i \omega_i \frac{\partial}{\partial \theta_i}$.

Le problème est ici la résolution de l'équation qui donne la fonction $z\dots$ et qui ne paraît pas simple à résoudre ! Passons donc à la dernière méthode de calcul de tores invariants quasipériodiques.

2.3 Méthode variationnelle

Cette méthode de recherche de tore invariant sur lequel la dynamique est quasipériodique de fréquence ω fixée est due à Percival (cf. [1] et [2]). On recherche un tore invariant Σ comme paramétrage $\theta \mapsto q_\Sigma(\theta)$. Pour cela, il faut repasser dans le formalisme lagrangien, par exemple en se souvenant que le lagrangien $L(q, \dot{q})$ est lié au hamiltonien H par :

$$\begin{cases} L(q, \dot{q}) = p\dot{q} - H(p, q) \\ \dot{q} = \frac{\partial H}{\partial p}(p, q) \end{cases} .$$

Rappelons de plus que sur un tore invariant quasipériodique de fréquence ω , la dérivée totale par rapport au temps est l'opérateur \mathcal{L}_ω défini par :

$$\frac{d}{dt} = \sum_i \omega_i \frac{\partial}{\partial \theta_i} = \mathcal{L}_\omega .$$

La méthode est alors donnée par le lemme :

Lemme 2. *Considérons la fonctionnelle suivante :*

$$\Phi(q) = \int_{\mathbb{T}^n} L(q(\theta), \mathcal{L}_\omega q(\theta)) d\theta .$$

Le paramétrage $\theta \mapsto q(\theta)$ est un tore invariant quasipériodique de fréquence ω si et seulement si il est un point stationnaire de Φ .

Remarquons que ce lemme est l'analogie de la recherche de points stationnaires de la fonctionnelle d'action pour la résolution des équations d'Euler-Lagrange, à ceci près que l'intégration s'effectue ici sur le tore standard de dimension n et non plus sur le temps t .

Concrètement, pour implémenter cette méthode, q (ou plutôt u) est développée en série de Fourier de N coefficients réels, et il nous reste à chercher les points stationnaires d'une fonction de \mathbb{R}^N dans \mathbb{R} . Pour cela, toutes les méthodes de gradients sont disponibles, avec l'inconvénient qui leur est propre, à savoir une convergence parfois lente, voire inexistante ; cependant, le grand avantage de cette méthode est d'être plus « universelle », c'est-à-dire de s'implémenter de la même manière, quelle que soit la dimension.

3. Perspectives

La première étape serait de terminer les procédures `trip` afin de pouvoir s'en servir sans états d'âme, en les appliquant à des systèmes intégrables tels que le pendule simple, mais surtout à des systèmes intégrables perturbés et à des systèmes non intégrables.

Ensuite, en restant dans l'optique présentée dans la première partie, il faudrait déterminer une méthode de comparaison à des solutions numériques, puis appliquer le tout à des problèmes de type N corps.

Références

- [1] I.C. Percival. Variational principles for the invariant toroids of classical dynamics. *J. Phys. A : Math. Nucl. Gen.*, 7(7) :794-802, 1974.
- [2] I.C. Percival. A variational principle for invariant tori of fixed frequency. *J. Phys. A : Math. Nucl. Gen.*, 12(3) :57-60, 1979.
- [3] Dietmar Salamon and Eduard Zehnder. KAM theory in configuration space. *Commentarii Mathematici Helvetici*, 64 :84-132, 1989.

La Bibliothèque de l'Institut de mécanique céleste et de calculs des éphémérides en 2006

Thérèse Derouazi

1. Composition

Son contenu est ciblé sur l'astronomie fondamentale et la mécanique céleste. Nous pouvons trouver dans notre bibliothèque des collections de périodiques anciens et contemporains (Nous sommes aujourd'hui abonné à une vingtaine de périodiques et recevons gracieusement des périodiques de nos confrères ou amateurs d'astronomie.

Nous possédons également un fond de monographies héritées de fonds anciens et contemporains. Nous l'enrichissons chaque année 80 à 100 ouvrages correspondant aux besoins de nos chercheurs. En 1999, le Bureau des longitudes nous a fait don de nombreux ouvrages concernant notre discipline, enrichissant ainsi notre collection.

Nous possédons en outre des catalogues d'étoiles et des éphémérides (nos propres publications et celles de nos confrères étrangers).

2. Création

Avant 1998, on pouvait qualifier de « petite » bibliothèque de laboratoire (malgré la richesse de ses fonds) la bibliothèque du Service des calculs des éphémérides et de mécanique céleste du Bureau des longitudes. En 1998, le Service deviendra l'Institut de mécanique céleste de l'Observatoire de Paris et, par voie de conséquence, dès 1999 notre bibliothèque sera associée à celle de l'Observatoire de Paris/Meudon

3. Travaux et mise en place

Pendant les travaux de rénovations de notre laboratoire, nous avons transformé la salle de réunion en bibliothèque : mise en place d'étagères murales, travées, tables, chaises, présentoirs. Installation également d'armoires et d'étagères dans le couloir du 2ème étage ainsi que du mobilier dans mon bureau qui servira de réserve.

Nous avons mis en cartons l'ensemble des ouvrages et les avons entreposés dans un des ateliers de l'Observatoire. Un premier inventaire manuel a été effectué avec la collaboration de Bettina Muselli.

Première installation des périodiques dans les rayonnages et dans le couloir, inventaire informatique sur fichier Excel de la totalité de nos périodiques, éphémérides, etc. à partir de l'inventaire manuscrit. Début d'inventaire des monographies et saisie sur logiciel de la bibliothèque de l'Observatoire de Paris (Cécile Pallares).

4. Période fin 2004 à 2006

Première partie

Remise en place dans les travées des périodiques par ordre alphabétique.

Les monographies ont été rangées sur les rayonnages le long des murs de la bibliothèque, par thème. Les ouvrages anciens, fragiles ou détériorés ont été rangés dans les meubles de mon bureau (réserve)

Nous avons entreposé dans des armoires au sous-sol les collections des éphémérides américaines, chinoises, indiennes et japonaises, ainsi que les doubles de nos propres publications.

Deuxième partie

Natalia Casvigny, catalogueuse, est venue entre 2004 et 2006 cataloguer les monographies, anciennes collections et nouvelles (environ 1200), sous forme de notices (description de l'ouvrage) dans le SUDOC (Système Universitaire de Documentation) et « Lorys » le logiciel de la bibliothèque de l'Observatoire de Paris.

5. Acquisition d'une monographie et création de sa notice dans le Sudoc (Système Universitaire de Documentation).

Nos ouvrages sont traités un par un :

- Inscription sur les cahiers d'inventaires avec pour chacun d'entre eux un numéro par ordre d'arrivée, date, description de l'ouvrage, son prix et le nom du fournisseur ;
- Apposition du cachet de notre bibliothèque sur la page de garde ;

Les responsables scientifiques établissent la cotation de chaque exemplaire, à l'aide de la CDU (Cotation Décimale Universelle). Cette cote apposée au dos de l'ouvrage désigne sa place dans la bibliothèque en fonction du sujet qu'il traite.

6. Consultation, localisation et prêt (par l'intermédiaire des bibliothécaires) inter-Universitaire sur le site <http://www.sudoc.abes.fr>

La bibliothèque de l'Observatoire de Paris possède un compte dans le Sudoc, ce qui nous permet de créer des notices sur ce site comme nous l'avons dit un peu plus haut.

- Premier cas : l'ouvrage existe dans le SUDOC. Nous exemplarisons nous-même cette notice dans le SUDOC, en nous servant de la fiche bibliographique du SUDOC à laquelle nous avons accès sur le compte de la bibliothèque de l'Observatoire de Paris.
- Deuxième cas : il n'existe pas dans le SUDOC. C'est alors à la catalogueuse de l'Observatoire de Paris de créer cette notice.

Une fois cataloguée dans le SUDOC, la notice de l'ouvrage est basculée sur le logiciel de la bibliothèque de l'Observatoire en réseau interne.

7. Périodiques

Comme nous l'avons dit au début, nous sommes abonnés à une vingtaine de périodiques. Et nous pouvons consulter en ligne certains de ces périodiques. Vous pouvez également consulter un autre site: <http://bibliosciences.inist.fr>

A l'avenir, le support papier sera remplacé petit à petit par la consultation en ligne (problème de stockage), nous aurons toutefois la possibilité d'imprimer les articles qui nous intéresseront plus particulièrement.

8. Exemple d'utilisation du serveur de la bibliothèque de l'Observatoire de Paris

Lors de ces journées scientifiques, j'ai donné, à titre d'exemple, trois ouvrages à localiser sur le site de la bibliothèque de l'Observatoire :

The Earth, ... / Jeffreys, Sir Harold, sixth ed. (disponible à l'Observatoire et l'IMCCE).

Navigation and Nautical Astr. / Stebbing (uniquement à l'IMCCE)

Dictionary of Minor Planetary Names, 2003 (disponible sur les trois sites : Meudon, Paris et IMCCE)

9. Ce qu'il reste à faire

Collation (inventaire physique) des périodiques en notre possession. J'ai déjà effectué celles de la Connaissance des Temps CdT, l'Annuaire, les éphémérides nautiques. Elles sont toutes incomplètes.

Rangement du sous-sol (de nombreux doublons)

Installation du PC dans la bibliothèque la à l'usage des lecteurs et des bibliothécaires

Finir l'exemplarisation des ouvrages que Natalia Casvigny avait entrepris.

Liste des cotations CDU utilisées dans la bibliothèque de l'IMCCE

Etagères de gauche à droite le long du mur séparant la bibliothèque du couloir

Informatique 004
004

Dictionnaires, glossaires 03

ASTRONOMIE 52

Astronomie théorique, mécanique céleste 521

521.1 Principes généraux et astronomie dynamique

521.12 Théories de la relativité

521.13 Problèmes généraux (n-body problem, parameters of orbits, kepler's equation, ..)

521.14 Théories des figures

521.17 Théories des perturbations

521.3 Détermination des orbites

521.8 Aspects astrométriques des éclipses, transit, occultations

521.9 Astrométrie, astronomie sphérique, astronomie de position

521.91 Coordonnées astronomiques et astronomie de position

521.93 Vitesse de rotation et position du pôle de rotation de la Terre

521.94 Systèmes des constantes et unités astronomiques

Théories de l'Astrophysique 522

Le système solaire 523

523.17 Origine des satellites

523.31 Un corps astronomique : la Terre

523.34 Lune

523.37 Satellites artificiels de la Lune et de la Terre

523.4 Les planètes et leurs satellites, planétologie

523.6 Milieu interplanétaire

523.9 Le Soleil

PHYSIQUE 53

550 Sciences auxiliaires de la Géologie 550

à Propriétés générales de la matière vivante 577

Mécanique générale 621

à Transport spatial, aéronautique et Astronautique 629.7

Etagères de gauche à droite le long du mur séparant la bibliothèque du bureau 209

MATHEMATIQUES 51

51 Mathématiques

510 Considérations fondamentales sur les mathématiques

510.8 Systèmes mathématiques généraux

512 Algèbre

514 Géométrie

515.1 Topologie

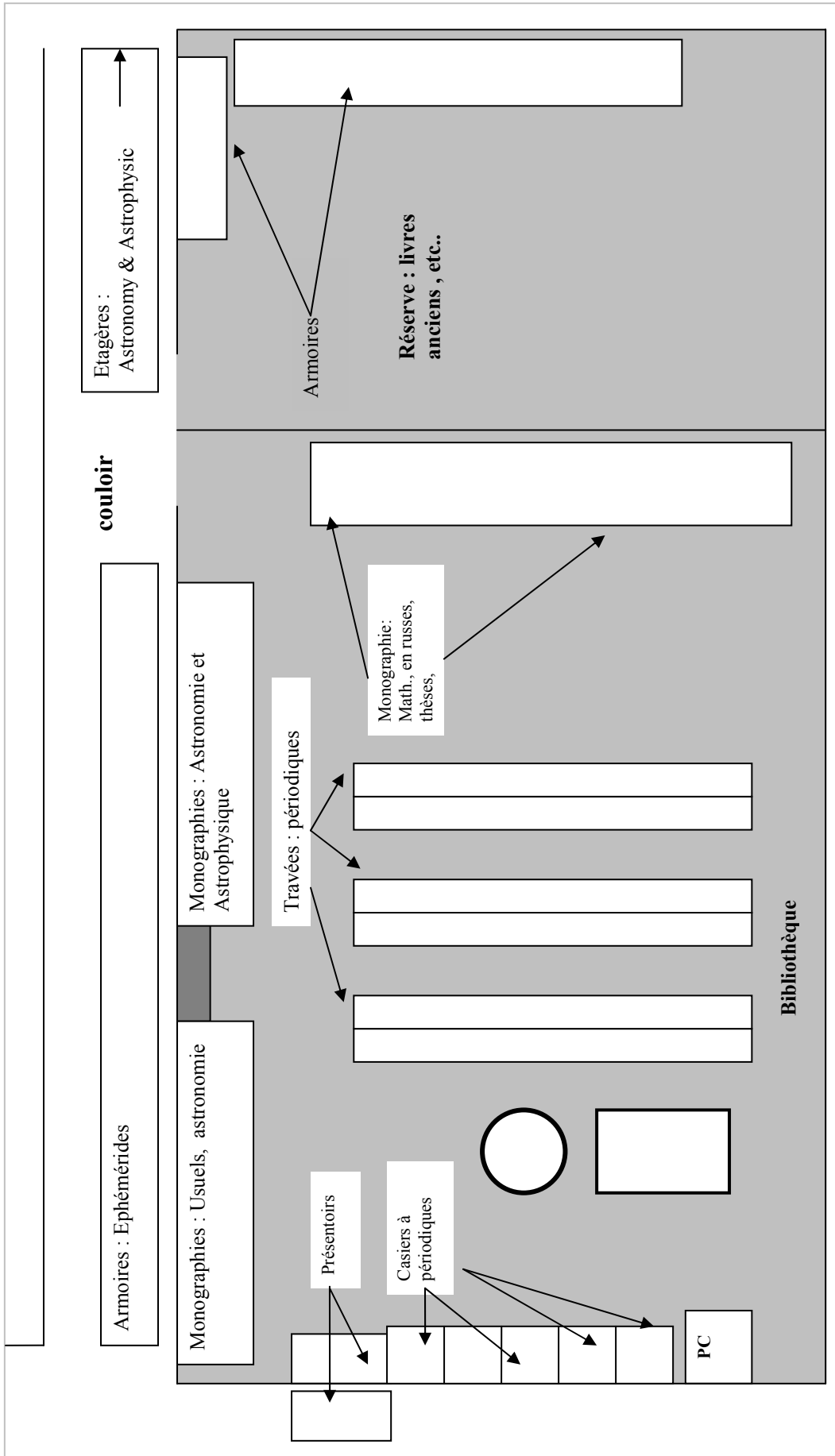
515.7 Espaces analytiques

517 Analyse mathématique

519 probabilités

Ouvrages en russe

Thèses 5(043.2)



Le 7 décembre 2007 : c'est l'équinoxe sur Uranus

J.-E. Arlot

Sommaire

- L'équinoxe sur Uranus: une opportunité pour des observations rares
- Les mystères du système d'Uranus
- La prédiction des phénomènes mutuels
- Des observations difficiles
- Un réseau d'observateurs
- Les buts scientifiques

Abstract

The transit of the Earth and the Sun in the equatorial plane of the planets makes possible the occurrence of mutual eclipses and occultations between the planetary satellites. The observations of such events are very fruitful because of the accuracy of the data obtained. Such events occur only during the equinox time of the planets i.e. every 6 years for Jupiter (1997, 2003, 2009, ...), every 15 years for Saturn (1995, 2010, ...) and every 42 years for Uranus (2007, ...).

Since these events are rare and occur at any time during a short period of a few months, the need of a worldwide network of observers is very important. We will explain the specific nature of these observations and encourage the observers to join the network, mainly for the Uranian occurrence in 2007.

1. Introduction

Depuis 1973, on observe intensivement les phénomènes mutuels pendant les périodes favorables pour les satellites galiléens du fait de leur magnitude qui les rend facilement accessibles à tout type de télescope. En 2007, les phénomènes mutuels se produiront entre les satellites d'Uranus qui sont plus faibles et plus difficiles à observer. Ainsi, afin d'obtenir autant d'observations que possibles, nous devons employer un réseau d'observateurs bien équipés de télescopes et des détecteurs capables fournir des données utiles.

2. Les observations des satellites des planètes

Les satellites des planètes sont autant de petits systèmes solaires orbitant autour de leur primaire. Il est très intéressant d'étudier de tels systèmes, montrant beaucoup d'effets dynamiques, en particulier dus aux perturbations par l'aplatissement de la planète, par les autres satellites et par le soleil et les autres planètes. Plus, quelques effets de marée doivent maintenant être mis en évidence si un nombre suffisant d'observations précises est disponible.

Dans ce but, nous devons faire régulièrement des observations qui sont de deux sortes :

- d'abord, des observations astrométriques directes (figure n°1). Les satellites sont des points dans un champ d'étoiles cataloguées. De telles observations ont été faites dans le passé avec des plaques photographiques et sont maintenant effectuées en utilisant des cibles de CCD. Cependant, une telle méthode a sa limite dans l'exactitude astrométrique comme indiqué dans la table n°1.

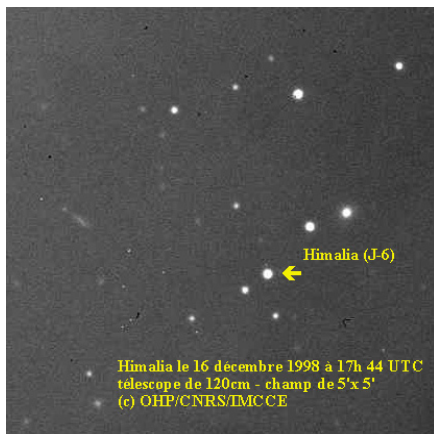


Fig. 1

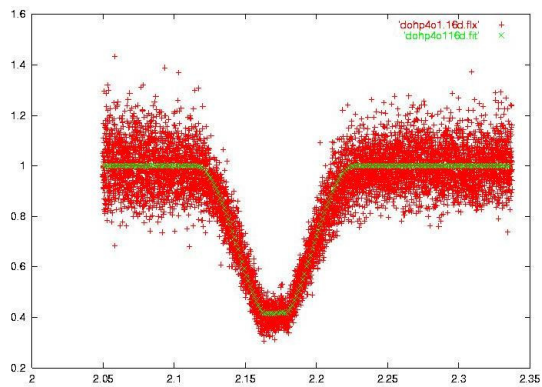


Fig. 2

- en second lieu, les observations photométriques de certains phénomènes tels que des éclipses ou des occultations. Les phénomènes principaux sont les éclipses par la planète elle-même se produisant, dans le cas des satellites galiléens, pour chaque révolution des satellites. Malheureusement, l'ombre de Jupiter n'est pas bien connue en raison de l'atmosphère épaisse qui diminue l'exactitude des observations (cf. la table n°1). Cependant, les phénomènes mutuels entre les satellites eux-mêmes sont beaucoup plus précis en raison de l'absence d'atmosphère sur ceux-ci. L'analyse et l'ajustement de la courbe de lumière photométrique fournissent la distance entre les satellites avec une exactitude en kilomètres et non en secondes de degré, ce qui est plus intéressant pour les objets éloignés (voyez dans la table n°1 l'exactitude pour les satellites galiléens et pour ceux d'Uranus qui sont plus éloignés).

Avec l'observation de phénomènes, la mesure astrométrique directe est remplacée par une mesure photométrique en fonction du temps (figure n°2). C'est une courbe de lumière qui inclut les propriétés physiques de la surface du corps et des paramètres dynamiques du mouvement des deux satellites.

Table n°1: L'exactitude pour chaque type d'observation

Kind of observation	Accuracy in mas	Accuracy in km
Eclipses by Jupiter	150	450
Old photographic plates	100	300
Transit circle	60	180
Plates newly reduced	50	150
CCD observations	40	120
Mutual events	15	45

The case of the Uranian satellites

Kind of observation	Accuracy in mas	Accuracy in km
CCD observations	40	400
Mutual events	6	60

3. Quand se produisent les phénomènes mutuels

Comme représenté sur la figure n°3, les phénomènes mutuels (éclipses quand un satellite traverse l'ombre d'un autre satellite et occultations quand un satellite passe derrière un autre satellite pour un observateur terrestre) se produisent quand la terre et le soleil traversent le plan équatorial de la planète ce qui est, dans le cas de Jupiter, de Saturne et d'Uranus, le plan orbital des satellites principaux.

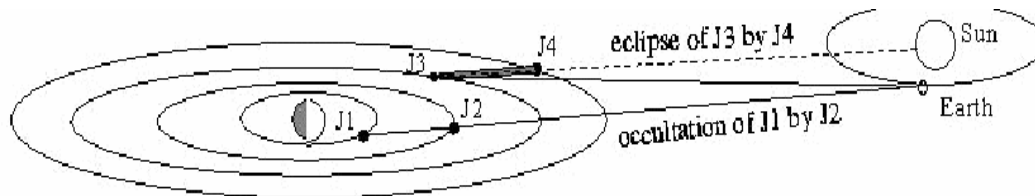


Fig. 3

La figure n°4 montre, comme exemple, les déclinaisons uranocentriques de la terre et du soleil en 2006-2008 : les phénomènes mutuels se produisent quand cette déclinaison devient zéro.

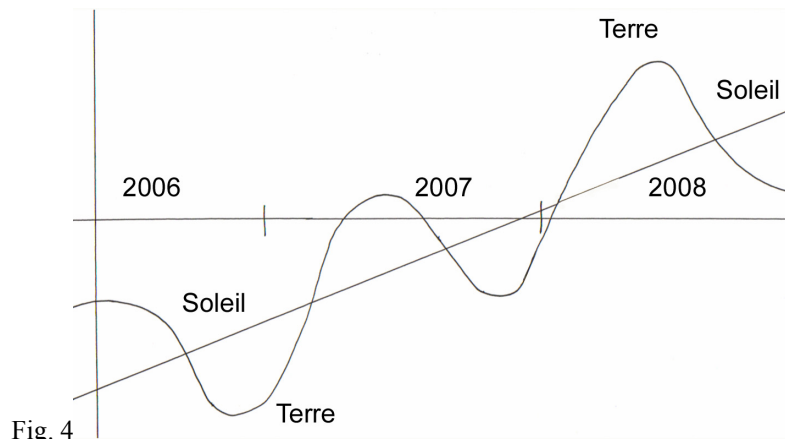


Fig. 4

4. Uranus: un système mystérieux

La sonde Pioneer pose un problème aux mécaniciens célestes : dès qu'elle s'est éloignée suffisamment de la Terre (elle se trouvait au niveau du système d'Uranus), son mouvement ne correspondait plus aux lois de la Mécanique Céleste aussi bien en mécanique classique newtonnienne qu'en relativité générale. Ces lois se modifieraient-elles dans ces régions éloignées ? Bien qu'un artefact soit probable, on peut se poser la question du mouvement d'Uranus que l'on étudie depuis longtemps : a-t-on constaté une irrégularité inexplicée ? La réponse est non mais la précision des observations n'a pu le permettre. Il s'agit d'écarts très petits très difficiles à mettre en évidence en observant la planète Uranus. Celle-ci est loin et donc les précisions angulaires se traduisent par des distances en kilomètres très grandes comme le montre la table n°1. Ainsi, les phénomènes mutuels dont la précision observationnelle est en kilomètre, seront mieux à même de permettre des observations astrométriques précises.

Un autre mystère provient de la comparaison entre les observations absolues des satellites et les observations de la planète Uranus. Le décalage en ascension droite et en déclinaison devrait être le même (les satellites tournent autour de la planète) mais la table n°2 montre des décalages incohérents.

Table n°2 : O-C pour Uranus et ses satellites pour des observations réalisées entre 2000 et 2005.

Objet	Observatoire	Résidu moyen en alpha (")	Résidu moyen en delta (")
Uranus	Flagstaff	-0.01	-0.05
Titania	Flagstaff	-0.10	-0.11
Oberon	Flagstaff	-0.11	-0.12
Uranus	Table Mountain	-0.02	-0.06
Umbriel	Table Mountain	-0.17	-0.11
Titania	Table Mountain	-0.09	-0.13
Oberon	Table Mountain	-0.12	-0.12
Uranus	Bordeaux	-0.12	-0.16
Umbriel	Bordeaux	-0.10	-0.07
Titania	Bordeaux	-0.14	-0.18
Oberon	Bordeaux	-0.13	-0.07

Afin de prédire les phénomènes mutuels, nous avons considéré trois éphémérides différentes :

- GUST86 (erreur interne 80 km soit 8 mas)
- GUST2006 (idem) correspondant à GUST réajusté
- LA06 (erreur interne 10 m soit 1 mas) nouvelle éphéméride construite à partir d'un modèle élaboré par V. Lainey.

On a finalement $|GUST86 - LA06| < 500$ km soit 50 mas au maximum, plutôt de l'ordre de 20 mas.

Cela montre qu'on peut attendre une erreur de l'ordre de 20 mas de la part des satellites. On constate cependant un O-C systématique de 100 mas explicable par un décalage en longitude dans l'éphéméride d'Uranus, décalage stable sur une période de 5 ans. Ce décalage n'apparaît pas pour les observations d'Uranus réalisées à Flagstaff et à Table Mountain alors qu'il apparaît sur les observations des satellites réalisées dans ces mêmes observatoires. Le résultat de Bordeaux est cohérent mais celui de Flagstaff et Table Mountain ne l'est pas.

5. Les prédictions des phénomènes

Nous avons réalisé les prédictions pour les trois éphémérides ci-dessus et avons obtenu des résultats un peu différents selon l'éphéméride. Rappelons les diamètres des satellites :

- Ariel: 1162 km soit 116 mas
- Umbriel: 1169 km soit 117 mas
- Titania: 1578 km soit 158 mas
- Oberon: 1522 km soit 152 mas
- Miranda: 480 km soit 48 mas
-

On trouvera dans la table n°3 quelques exemples de phénomènes avec les différences selon les éphémérides, en secondes de temps pour l'instant du phénomène et en mas pour le paramètre d'impact (à rapprocher des valeurs des rayons).

Table n°3 :

Phénomène	Date	Instant du phénomène		Paramètre d'impact	
		GUST86 => 2006	GUST2006 =>LA06	GUST86 => 2006	GUST2006 =>LA06
1 O 2	24/04	+97s	+4s	0 mas	+6 mas
1 O 3	03/05	+96s	+127s	-1 mas	-26 mas
1 O 4	03/05	+30s	+47s	0 mas	+4 mas
1 O 5	23/05	-217s	+497s	> - 30 mas	> + 30 mas
2 O 3	30/04	+133s	+7s	0 mas	-17 mas
2 O 4	04/05	+61s	+64s	-1 mas	+22 mas
2 O 5	20/08	+137s	+143s	0 mas	-10 mas
3 O 4	03/05	+51s	+119s	+1 mas	+1 mas
3 O 5	12/07	-145s	-244s	0 mas	+8 mas
4 O 5	11/05	-83s	-177s	> - 37 mas	-21 mas

6. L'observation des phénomènes mutuels

Même si l'observation des phénomènes mutuels semble être facile, beaucoup de précautions doivent être prises afin d'obtenir une observation utile. Tout d'abord, le télescope et le récepteur doivent être adaptés au phénomène : la taille du télescope doit être choisie selon les satellites. Si les satellites galiléens ont une magnitude autour de 5 et ont besoin seulement de petits télescopes, ceux de Saturne ont une magnitude de 10 à 15 et ceux d'Uranus de 14 à 16 ayant besoin ainsi d'un plus grand télescope, au moins avec une ouverture d'un mètre. N'oubliez pas que l'observation photométrique doit être bien échantillonnée : un point chaque seconde de temps est nécessaire selon la durée du phénomène. Pour un long phénomène (plus de 20 minutes), un point toutes les 5 secondes de temps est suffisant mais pour des phénomènes de moins de 10 minutes, un point chaque seconde de temps peut être nécessaire.

En second lieu, on doit rappeler que chaque point de la courbe de lumière doit être daté en temps universel UTC à moins de 0.1 seconde de temps : la vitesse des satellites étant autour de 10 kilomètres par seconde, une exactitude de la synchronisation de 0.1 seconde de temps peut mener à une exactitude astrométrique d'un kilomètre !

Troisièmement, le filtre doit être choisi selon le fond de ciel. Pour des satellites loin de la planète, un filtre R peut être utilisé. Pour des satellites près de la planète, un filtre spécifique qui obscurcira la planète est très utile. N'oubliez pas qu'un filtre étroit impliquera un plus grand télescope ! Les phénomènes peuvent montrer une grande chute en magnitude ou une plus faible. Les courbes de lumière peuvent être bruitées ou pas. Les figures 5 montrent plusieurs exemples des courbes: 5a, une courbe non bruitée ; 5b, une courbe non symétrique fournissant des informations sur la surface du satellite occulté ; 5c une forte chute en magnitude et 5d une courbe avec une très faible chute en magnitude.

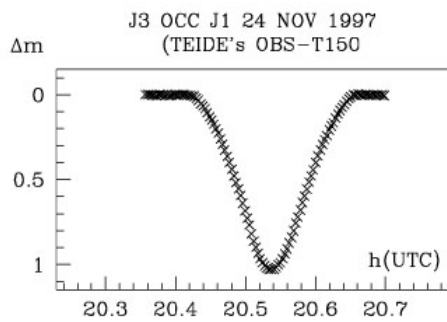


Fig. 5a

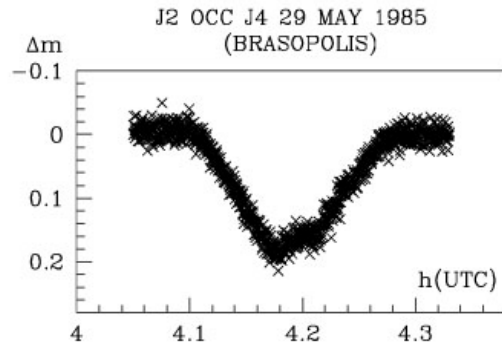


Fig. 5b

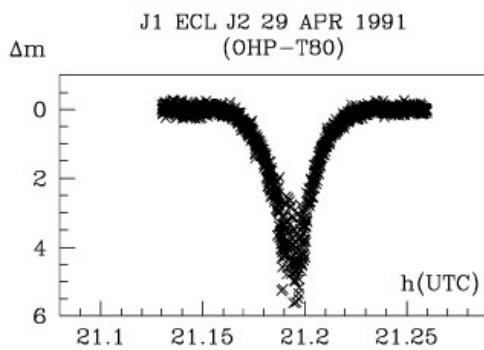


Fig.5c

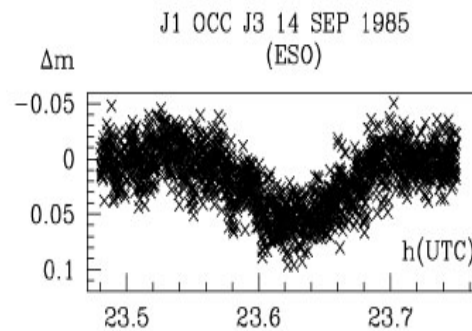


Fig.5d

Le problème principal des observateurs est qu'il n'est pas possible de choisir la date du phénomène. À ce moment-là, pour un site donné d'observation, les satellites peuvent être bas au-dessus de l'horizon ou le ciel peut être nuageux. Un grand réseau de sites d'observation permet d'avoir au moins un site où l'observation est facile dans de bonnes conditions. Cependant, puisque l'observation est faite en photométrie relative, il est possible d'obtenir même dans des conditions difficiles des données valables. Il suffit de mesurer pendant toute la durée du phénomène, outre le signal du satellite éclipsé ou occulté, celui d'un satellite non touché par le phénomène et de flux constant ainsi que les fonds de ciel derrière les objets observés. Soustractions et divisions nous rendront un signal correct. Ceci montre à l'intérêt d'une cible bidimensionnelle tel un CCD pour l'observation des phénomènes mutuels.

7. Le réseau des observateurs

Ces observations ont besoin d'un réseau d'observateurs pour plusieurs raisons :

- les phénomènes se produisent à tout moment : les observateurs doivent avoir les objets bien observables (au moins au-dessus de l'horizon !) ainsi les sites d'observation doivent être bien distribués tout autour de la terre ;
- les conditions météorologiques peuvent être différentes d'un emplacement à l'autre, ainsi plus grand est le nombre de sites disponibles, plus grand sera le nombre d'observations réalisées ;
- chaque site dispose d'un ou plusieurs récepteurs fonctionnant à différentes longueurs d'onde (spectre solaire et longueurs d'onde infrarouges) ainsi les sites seront complémentaires. La plupart des sites d'observation actuels sont dans l'hémisphère nord ce qui est pénalisant quand la déclinaison des objets observés est négative. Pour la campagne d'Uranus, la faible magnitude des satellites exigera de plus grands télescopes. Il est important que de nouveaux observateurs rejoignent notre réseau.

8. Le cas des satellites d'Uranus en 2007

En 2007-2008, saisissant l'occasion de l'équinoxe sur Uranus, nous observerons des phénomènes et des éclipses mutuels par la planète des satellites. La figure 6 montre les principaux satellites. La figure 7 montre les plus petits satellites : elle a été prise dans la longueur d'onde infrarouge, montrant l'anneau d'Uranus et des petits satellites faibles, difficile à observer en lumière visible.

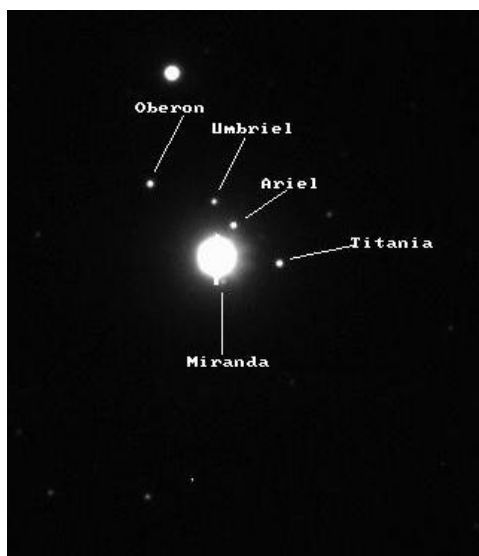


Fig. 6

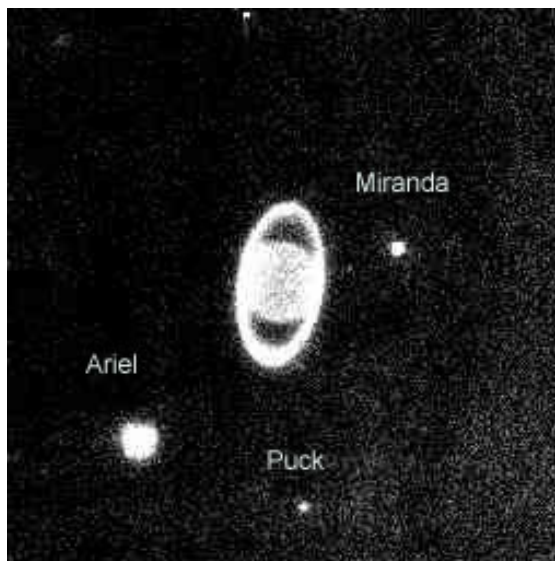


Fig. 7

La magnitude V des satellites est la suivante :

- Ariel: magnitude 14.4
- Umbriel: magnitude 14.8
- Titania: magnitude 13.8
- Oberon: magnitude 14.2
- Miranda: magnitude 16.5
- Puck: magnitude 20

C'est la différence de magnitude importante entre les satellites et la planète Uranus qui rend difficile les observations. Nous encourageons à observer les phénomènes impliquant Miranda et Puck dans l'infrarouge. La liste des phénomènes observables ainsi que l'information technique au sujet de l'observation est disponible sur le site Web de l'IMCCE à l'adresse : <http://www.imcce.fr/pheura07> . La table 2 fournit les phénomènes mutuels observables de France. On trouvera la visibilité des autres phénomènes sur le site web ci-dessus.

Table n°2: Principaux phénomènes observables depuis la France (16 parmi 60)

An	mois	jr	hr	mn	sec	phénomène
2006	7	15	0	8	4.	5 Oc 1 P
2007	7	6	1	55	53.	5 Ec 2 A
2007	8	6	1	8	25.	4 Oc 2 P
2007	8	13	3	6	38.	1 Oc 2 P
2007	8	14	22	57	34.	2 Oc 5 P
2007	10	9	20	24	23.	5 Ec 2 P
2007	10	21	18	13	28.	5 Ec 1 A
2007	11	19	18	10	9.	1 Ec 5 T
2007	11	29	19	7	16.	2 Ec 4 P
2007	11	30	21	36	17.	2 Ec 1 P
2007	11	30	18	49	49.	3 Ec 4 P
2007	12	2	17	15	45.	3 Ec 2 P
2007	12	16	17	33	46.	2 Ec 1 P
2007	12	24	18	56	3.	2 Ec 1 P
2007	12	25	17	29	29.	2 Ec 1 P
2008	8	12	22	27	58.	1 Ec 5 T

Explication des phénomènes :

5 O 1 signifie que le satellite 5 occulte le satellite 1
 2 E 5 signifie que le satellite 2 eclipse le satellite 5

9. Les buts scientifiques de l'observation des phénomènes mutuels

L'observation des phénomènes mutuels fournit des informations valables pour plusieurs buts :

- l'étude de la dynamique des systèmes des satellites : ce sont de petits systèmes solaires permettant de comprendre la formation et l'évolution de tels systèmes. Dans ce but nous avons besoin d'observations astrométriques précises afin de pouvoir établir les modèles fiables du mouvement.
- la fabrication d'un modèle comprenant tous les effets comme la dissipation d'énergie due aux marées : ceci nécessite une précision astrométrique élevée des observations afin de mesurer tous les paramètres
- l'analyse des observations infrarouges peut aider à comprendre la surface des satellites (la température, l'albédo ...) ainsi que d'autres types d'observations, particulièrement celles des sondes spatiales.

Conclusion

Des phénomènes rares permettant d'effectuer des tests de précision sur nos modèles dynamiques du système d'Uranus vont se produire en 2007. Il importe de mettre en place un réseau d'observateurs aussi étendu que possible afin d'être en mesure d'observer le plus grand nombre de phénomènes. Site web: <http://www.imcce.fr/pheura07>

Contact par e-mail: [pemu@imcce.fr](mailto:pheму@imcce.fr)

Un atelier de travail rassemblant les observateurs potentiels et les théoriciens intéressés par ces observations se tiendra à Paris en novembre 2006. Informations sur le site web: <http://paris2006.imcce.fr>

Tracers of collisions in the main belt

Mirel Birlan

Abstract

Mutual collisions during the Main Belt history are at the origin of asteroid families as well as the creation of complex systems of objects (double, triple, binary or rubble pile objects). Investigating the nature of the surface of fragments by spectroscopic methods is necessary for refining several aspects, namely: mineralogical homogeneity of the whole surface of object, degree of space weathering, homogeneity of the parent body, mineralogy of family members, and the balance between the space weathering and the astrophysical timescale for a given object. In particular, the 0.8-2.5 μm spectral range is essential for the analysis of spectral features typical for silicate minerals. The paper presents the results obtained for two peculiar asteroids: the binary asteroid 809 Lunda, and 832 Karin the largest asteroid inside Karin family.

1. Introduction

Several discoveries of complexes of bodies among asteroids have been announced during the last ten years. The binary or multiple structures of asteroids, hypothesized around 1980 (Zappala et al (1980), Leone et al (1984)), were accessible for observing later thanks to the large aperture telescopes and innovative techniques (adaptive optics, correlated observations photometry/radar, ...).

When the components of a double object have comparable sizes, the generic term of *binary object* is commonly used. Particular geometries of the system will allow observations from the ground where the components will be mutually occulted. Recording these events by photometric techniques will allow the obtention of the lightcurve, and further, modeling several physical and dynamical parameters such as dimensions, shape, bulk density and dynamical parameters of binary system.

The occultation of a component by its pair in a binary asteroid represent an important event which allows to investigate its mineralogical structure and to discriminate between the homogeneity/heterogeneity of components, thus tracing a most probable history of the system. The low-resolution spectroscopy in the visible and the near-infrared regions will be involved in this kind of studies. The correspondent lightcurve has particular behaviors, exhibiting several profiles and depths in magnitude decreasing, associated to mutual event.

Spectroscopic techniques might be also used in studying the young families of asteroids in the main-belt. The asteroids are considered a population dynamically relaxed, characterized by rare mutual collisions. Recent work (Nesvorný et al (2003); Nesvorný & Bottke (2004); Farley et al. (2006); Nesvorný et al (2006)) reveal young families of asteroids resulted from relative recent breakups and re-accretion of fragments of the parent bodies (in the order of tenths of millions of years). Some of them (e.g. Karin, Veritas) could be related to the solar system dust bands or dust showers. The study of young families allows to refine our knowledge concerning the spreading mechanisms of orbital elements of families members by small, but long term effects such is the Yarkovsky effect (Nesvorný & Bottke (2004)).

Sophisticated numerical codes have been also used also recently (Michel et al (2002, 2004), Nesvorný et al (2006)) in order to study the formation of asteroid families by both fragmentation and gravitational re-accumulation. The post-collision phase reveal a re-accumulation of fragments in aggregates commonly named *rubble piles*, held together by small gravitation field, by little (or zero) tensile strength. This implies a structure of the surface very unstable on the external conditions (planetary perturbations, gravitations instabilities,...). This scenario favours the fresh surface of rubble pile asteroids, less affected by the *space weathering* effects.

Since the discovery of its young family, the asteroid 832 Karin was the subject of a systematic campaigns of observations using both photometric and spectroscopic techniques. Near-IR

spectroscopy (Sasaki et al (2004)) revealed spectra with quite distinct trends, corresponding to different surfaces of the asteroid. The authors conclusion is that 832 Karin presents surface variations corresponding to different ages of minerals (i.e. experiencing several degrees of space weathering).

The enlargement of the available observing timescale to do spectroscopy in the solar system has increased the sample of asteroids with well defined spectral characteristics, also widening the asteroid period coverage having spectra taken at different rotation phases. If any difference is to be found, discriminating the real, intrinsic variation from more spurious instrumental induced artifacts (Gaffey et al (2002)) is a necessary step before advancing a surface inhomogeneity explanation.

Laboratory studies are also emphasized in order to combine both spectra obtained through astronomical observations with spectra of irradiated minerals, in order to simulate the space weathering. One important aspect of this promising work is the establishment/correlation of the surface status (astrophysical age) with the amount of irradiation experienced by this surface.

The asteroid 809 Lundia was reported as a V type asteroid by Florczak et al (2002) based on the spectroscopic observations in the visible region. As long as its orbital elements are far enough from Vesta family, the authors suggested 809 Lundia to be a V-type non-member of Vesta family. Carruba et al (2005) have investigated also the possibility of 809 Lundia as a member of Vesta family to whom the orbital elements drifted mainly by non-gravitational effects, and the object being captured by the ζ_2 resonance. Last but not least, photometric observations of this asteroid allow (Kryszczyńska et al (2005)) to conclude that 809 Lundia is a binary system spinning with a period roughly estimated of 15.4 hours.

The main purpose of this article is to present the results of observational campaigns in near-IR of two asteroids: the binary asteroid 809 Lundia and the asteroid 832 Karin. The article describes the observing technique, data reduction procedures, and the main aspects which occur in discrimination between various sources of noise and the intrinsic signal obtained from the asteroid.

2. Observations

Both objects were observed in the 0.8-2.5 μm spectral region. The observations were carried out using the SpeX instrument mounted on the IRTF, located on Mauna Kea, Hawaii. Remote observing technique was used from CODAM - Paris Observatory (Birlan et al (2004)), 12,000 km away from the telescope. The time lag between Paris and Hawaii allows day light remote observations. A versatile schedule together with the remote observing facilities of IRTF allow short, punctual observations which could not be predicted long time in advance. This is the case of the asteroid 809 Lundia, who was announced as a binary object in October 2005, and for which it is important to have coordinated photometric and spectroscopic observations in order to predict with accuracy the moment of mutual events of the system.

The asteroids 809 Lundia and 832 Karin were observed in circumstances described in Table 1. In the case of 809 Lundia, the observation time was limited for two time intervals of one hour each, during the technical time of the telescope, for two distinct configurations of the binary system. The lightcurves of the asteroid 809 Lundia, obtained just before the run allowed observations to be planned around the time corresponding to one of the minima of the lightcurve and the plateau, respectively.

SpeX was used in Low resolution Prism mode, with a 0.8 x 15 arcsec slit oriented North-South. Spectra of the asteroids and solar analogs were obtained alternatively on two distinct locations on the slit (referred to as A and B beam).

832 Karin was observed as close as possible to the zenith, while 809 Lundia was observed at different airmasses, function of the desired configuration. The solar analogs were chosen as close as possible to the asteroids.

3. Results and discussion

Data reduction was carried out by means of standard procedures for near-IR spectral range. The median flat-field for each night was constructed. The A-B pairs of images were subtracted in order to eliminate the sky influence. The result was the addition of these images. The final images were flat-fielded, and collapsed to a two dimensional pixel-flux matrix. Finally, the calibration in wavelength, using the Argon lamp lines was performed.

Date (UT)	Object	Texp	Itime (s)	Cycles	Airmass	Seeing (")	Humidity (%)
Nov, 4, 2003, 6h 16m	832 Karin	32 min	120	8	1.21	1.0	28
Nov, 4, 2003, 5h 18m	SA 113-276	4 min	40	3	1.06	1.0	28
Nov, 5, 2003, 5h 35m	832 Karin	24 min	120	6	1.17	0.7	23
Nov, 5, 2003, 6h 35m	SA 113-276	128 s	8	8	1.14	0.7	23
Dec, 21, 2005, 7h 16m	809 Lundia	16 min	120	4	1.04	0.6	18
Dec, 21, 2005, 7h 30m	HD 16018	11.0	25.0	12	1.05	0.6	18
Dec, 22, 2005, 9h 26m	809 Lundia	20 min	120	5	1.52	0.56	14
Dec, 22, 2005, 10h 04m	HD 16018	2s	0.5	2	1.53	0.56	14

Table 1: Observational circumstances occurred during the observations of 809 Lundia and 832 Karin. Date, exposure time, airmass, seeing and humidity are presented for both asteroids and solar analogs.

The same steps were performed for solar analogs. This paper presents the spectral reflectances of the asteroids with respect to the solar analogs, normalized to $1.25 \mu\text{m}$ (value of the maximum in J filter).

As long as accurate results are required, a cautious analysis has to be carried out. We can identify several sources of errors who can hide the intrinsic properties of the asteroid. Several sources of errors could be identified, namely: 1) the atmospheric influence, 2) the spectral variations of solar analog, 3) the intrinsic anomalies in instrument recording.

The atmospheric influence is presented mainly by the amount of water vapours in the atmosphere column, which could exhibit variations between the time interval of the asteroid integration and those of the standard star. Its influence could be minimized by the atmospheric modelling during the procedure of data reduction. Another manifestation of atmospheric influence could be the different extinction coefficient depending upon the azimuthal angle of observations (Gaffey et al (2002)). This error could be minimized if the solar analog is chosen as closely as possible to the asteroid target.

The spectral analog variations in time must also be taken into account as a possible element which could impede the results. Thus, the solution must be the choice of reliable solar analogs, (i.e. stars with the same spectral class, well studied in the near-IR spectral region). These analogs could be observed several times during the night.

By the intrinsic anomalies in instrument recording we define all the functionality of the instrument (spectrograph) which may change the signatures of the asteroid final spectrum. In our case, the observations were performed in two consecutive nights. Tests concerning the signal analysis for the standard stars must be done to study possible exchanges in the spectral trend of the standard star spectrum between the nights.

For the high quality spectra of the asteroids, not only the high S/N ratio, but also the error-bars in the flux and their propagation in the final product must be taken into account. Furthermore, these spectra will be the input for particular studies linked to the mineralogy of the surface.

In our case, we experiment several steps, iteratively. The data reduction procedure is synthezitized in Figure 1. The diagram provides good results in a few steps.

3.1 832 Karin

The results obtained for 832 Karin are presented in Figure 2. The correction applied by the procedure described in Figure 1 decreases the difference between the spectra, however the spectra remain distinct, the errorbars of reflectances at the same wavelength cannot be superimposed. The global trend of both spectra are similar, with absorption bands around $1 \mu\text{m}$ and a shallow absorption band around $2 \mu\text{m}$, which corresponds to silicate minerals. The difference in spectra could be associated to material which have experienced different irradiation (space weathering).

At this stage, the science concerning the asteroid 832 Karin will be oriented toward a precise/qualitative analysis of its mineralogy, by taking into account both the visible and the near-IR spectral intervals. The possibility of heterogeneous regions of the asteroid surface will be also taken into consideration. Finally, the approach with reflection spectra obtained in the laboratory from terrestrial minerals and meteoritic material will be investigated.

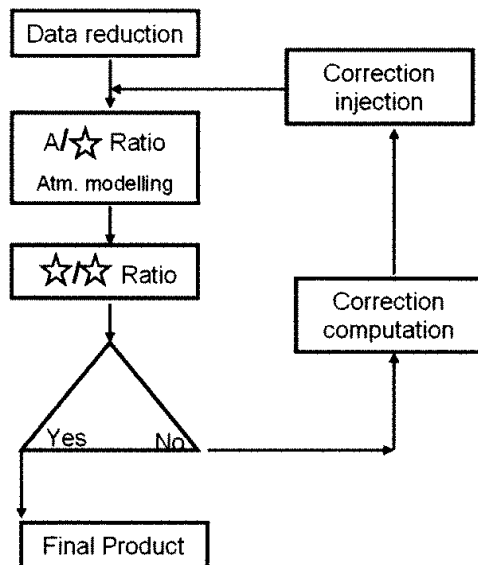


Figure 1: Diagram explaining the data reduction procedure applied for obtaining spectra of the asteroid 832 Karin.

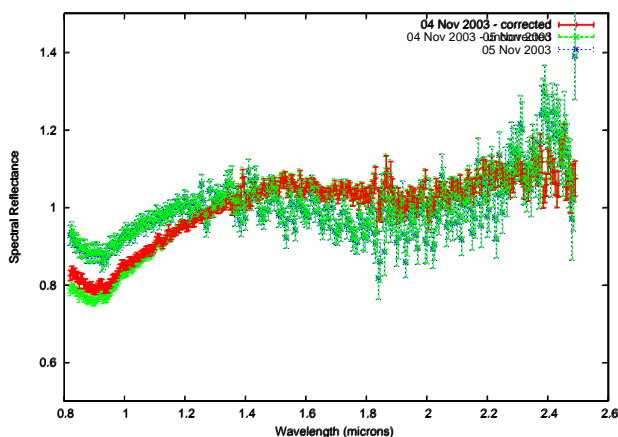


Figure 2: Spectra of 832 Karin obtained in November 4 and November 5, 2003, obtained with respect to the standard star SA 113-276. The spectrum of November 4 was corrected following the procedure presented in Figure 1 in red color. The spectra presents similar trends, but they are clearly distinct, outside the error-bars. This may support the hypothesis of surfaces which have been experienced different degrees of space weathering.

3.2 809 Lundia

809 Lundia analysis was performed with respect to the HD 16018 solar analog. The spectra of the asteroid, normalized to $1.25 \mu\text{m}$ and presented in Figure 3 are the first obtained in peculiar conditions of a spectroscopic study of a binary system in coordination with photometrical observations. The planning of observations was made in order to observe spectroscopically at least a minima of the lightcurve. This occurred in December 22, 2005, at 11h50m UT when one of component was occultated by the other. The blue color spectrum in Figure 3 corresponds to a moment very close to this minimum. As the magnitude 809 Lundia drops with more than an unit, this effect could be observed also in terms of error bars of the spectrum comparing with the one obtained in December 21, 2005 in the conditions of similars integration time and a minor difference in atmospheric extinction.

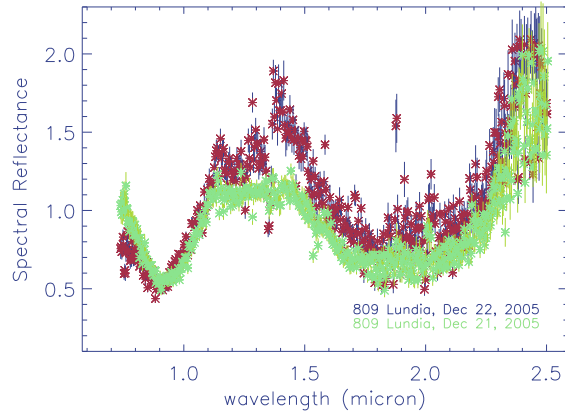


Figure 3: Spectra of 809 Lundia obtained in December 21 and 22, 2005, obtained with respect to the standard star HD 16018. The spectrum of December 22 corresponds to a position in the lightcurve on which one component is occulted by the other one, while the spectrum of December 21 corresponds to the plateau of the lightcurve (contribution of both components).

In December 21, 2005, the spectrum cooresponded almost to the plateau of the lightcurve (i.e. the collected flux is the contribution of both components, in almost equal proportions).

The eye-made preliminary analysis conclude for 809 Lundia a typical V-type spectrum in the near-IR region, with large absorption bands around 1 and 2 μm for both spectra. Our data support the classification proposed by Florczak et al (2002). The visible part of the spectrum, combined with the present one can be easily designed, allowing to obtain the entire absorption band with the minimum one around 1 μm .

The differences between spectra are included in the error-bar, which may conclude to a binary system with homogeneous components in terms of mineralogy of theirs surfaces. The dichotomy between spectra are mainly in the region 1.2-1.45 μm . As well as this region contains telluric bands, a deep and carefully analysis will be done (i.e. atmospheric modelling).

In the case of a binary system, in order to have the highest contrast between spectra components, the ideal geometry of observations would be to record two consecutive mutual events (central, if possible) for which the contribution in the flux belongs to each component.

3. Conclusions

The space weathering has been proposed for long time as one of the principal mechanisms who partially explain the paradox asteroids-meteorites. Near-IR spectroscopy could be used as a tracer of this alteration for some objects of the main-belt, namely objects issued for relatively recent collisions, and complex ones.

In the case of the asteroid 832 Karin, we can conclude a relative diference between spectra which could be explained by regions on the asteroid surface experiencing different degree of maturity.

For the binary object 809 Lundia, the spectra obtained in two distinct geometries exhibit similar features, however more studies are under wrk in order to confirm a possible/probable homogeneity of this complex.

Acknowledgments

This article is based on IRTF/SpeX observations performed in remote observing mode from CODAM - Paris Observatory.

References

- Birlan M., Barucci M.A. et al, 2004, AN 6-8, p. 571-573
- Carruba V., Michtchenko T.A., et al, 2005, A&A 441, 2, p. 819-829
- Farley K.A., Vokrouhlický, D., et al 2006, Nature 439, 7074, p 295-297
- Florczak M., Lazzaro D., et al 2002, Icarus 159, p. 178-182
- Gaffey M., Cloutis Z.A., et al in ASTEROIDS III (Eds W. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi, R.P. Binzel) University of Arizona Press, 2002
- Kryszczyńska A., Kwiatkowski T. et al, 2005, CBET 239.
- Leone G., Paolicchi P., et al 1984, A&A 140, p 265-272
- Michel P., Benz W., et al. 2002, Icarus 160, p. 10-23
- Michel P., Benz W., Richardson D.C. 2004, PSS 52, p. 1109-1117
- Nesvorný D., Bottke W.F., et al 2003, AJ 591, 1, p 486-497
- Nesvorný D., Bottke W.F. 2004, Icarus 170, p 324-342
- Nesvorný D., et al 2006, Icarus (in press)
- Sasaki T., Sasaki S., et al 2004, AJ 615, 2, L161-L164
- Zappala V., Scaltriti F. et al. 1980, MP 22, p 152-163

Nouvelle réduction des plaques photographiques des satellite galiléens de Jupiter: premiers résultats.

Vincent Robert

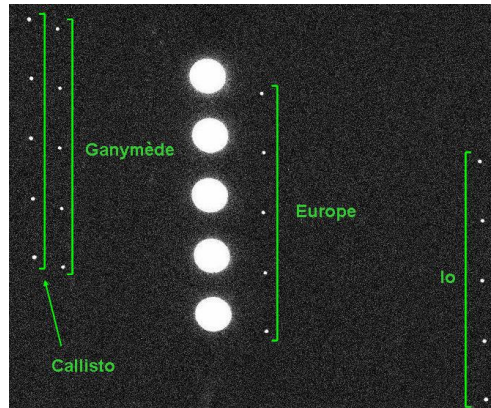
Introduction

Le projet de réduction des plaques photographiques ne peut être introduit sans parler de Monsieur Dan Pascu. Membre du United States Naval Observatory (USNO, Washington, USA), Dan Pascu a réalisé de nombreuses observations des satellites galiléens de Jupiter et ce, depuis l'année 1980 jusqu'en 2000.

Ces plaques étaient étudiées manuellement jusqu'à ce que Monsieur Pascu devienne retraité: l'USNO ne désirant pas poursuivre une analyse complète, l'IMCCE hérita des dites plaques qui ont ainsi pu être numérisées à la MAMA (GEPI) de l'Observatoire de Paris.

1. Les plaques de Dan Pascu

Numériquement parlant, il s'agit d'images fits de 16384 pixels par 12288 dont l'échelle théorique est de 20,843 ou 20,851"/mm. Ces dimensions nous confèrent un champ d'étude d'environ 57 minutes d'angle sur l'axe horizontal. Chaque plaque peut comporter de 4 à 7 observations successives et de 1 à 17 étoiles.



2. Une procédure d'analyse

- La première étape de cette procédure consiste à utiliser le programme Source Extractor (E. Bertin, IAP) afin de créer un catalogue d'objets de l'image étudiée: tous les éléments significatifs présents sur la plaque seront détectés puis rangés dans un fichier "catalogue" selon des paramètres préalablement renseignés (positions sur X et Y, erreurs sur ces positions...).

Il est à noter que les défauts de la plaque qui ont été numérisés peuvent aussi être détectés; ainsi il n'est pas rare de disposer d'un catalogue d'objets de plus de 700 lignes.

- Aussi la seconde étape de l'analyse consiste à appliquer un programme dit de "récurrence", au catalogue édité par Source Extractor. Depuis l'image ci-dessus: si les caractéristiques d'un objet sont répétées cinq fois dans le catalogue, il sera gardé en mémoire; si de plus, ces dites caractéristiques vérifient des tests d'écart de positions, alors l'objet sera sauvegardé.

Un fichier ne contenant que les éléments significatifs est créé en clôture de programme.

- L'avant-dernière étape consiste à identifier les étoiles de référence depuis le précédent fichier. Un programme simple permet de comparer les coordonnées (calculées) des étoiles détectées sur

la plaque à celles d'étoiles de divers catalogues: qu'il s'agisse de l'Ucac2, du Tycho2 ou encore de l'Hipparcos. Cette opération faite, un input est mis en forme pour le programme de réduction astrométrique.

- Le programme de réduction n'est pas encore terminé mais il nous a paru indispensable, avec Monsieur Valery Lainey, de travailler longuement dessus et ce pour plusieurs raisons.

Ce code doit être parfaitement prédisposé aux plaques de Dan Pascu et donc parfaitement intégré à la procédure. En plus de ces indications, il devra permettre de travailler avec un nombre limité de références (moins de 3 étoiles) et proposer le choix du nombre de paramètres à tenir en compte lors de la réduction astrométrique.

3. Les premiers résultats

Une première réduction astrométrique a été effectuée via le programme Priam (J. Berthier, IMCCE) et nous a permis d'obtenir les résultats suivants pour Io et Europe.

```

Satellite: J1 Io (Valery Lainey V. 1.1.)
  Observatory N: 786 - U.S. Naval Obs., Washington (since 1893)
Coordinates astrometric
  JD           O-C(alpha),"  O-C(delta),"
2449521.577894 -0.0415   -0.0225
2449521.578356 -0.0595   -0.0241
2449521.578877  0.0152   -0.0039
2449521.579456 -0.0457   0.0441
-----> 4
Mean O-C(alpha) -0.0329"  Mean O-C(delta) -0.0016"
Sigma O-C(alpha) 0.0435"  Sigma O-C(delta) 0.0276"
Sigma O-C(distance) 0.0515"

```

```

Satellite: J2 Europe (Valery Lainey V. 1.1.)
  Observatory N: 786 - U.S. Naval Obs., Washington (since 1893)
Coordinates astrometric
  JD           O-C(alpha),"  O-C(delta),"
2449521.577894 -0.0431   0.0154
2449521.578356 -0.0059   -0.0234
2449521.578877 -0.0065   -0.0830
2449521.579456  0.0438   0.0223
-----> 4
Mean O-C(alpha) -0.0029"  Mean O-C(delta) -0.0172"
Sigma O-C(alpha) 0.0310"  Sigma O-C(delta) 0.0452"
Sigma O-C(distance) 0.0548"

```

Le service des renseignements astronomiques

Philippe Duhamel, P. Rocher

L'IMCCE a en charge le service des renseignements astronomiques de l'Observatoire de Paris. Ce service composé de deux techniciens est dirigé par un responsable scientifique astronome.

Les demandes de renseignements parviennent au service par les moyens de communication actuels. À savoir via une ligne téléphonique dédiée qui répond au 01 40 51 22 70, par courrier postal, par fax, ou encore par le truchement d'un courriel dont l'adresse électronique est sr@imcce.fr.

Ces demandes émanent de personnes que l'on peut ranger en trois catégories :

- Les particuliers : il s'agit de demandes de renseignements les plus variés (heures des levers et couchers des astres, date des événements et phénomènes astronomiques divers).
- Les professionnels : les cabinets d'architectes et de contentieux d'assurance, les équipes de réalisation cinématographique, les éditeurs de calendriers et d'agendas, les présentateurs des bulletins météorologiques (TF1 Antenne2) et les journalistes de la presse spécialisée ou non.
- Les institutionnels : réquisition des officiers de police judiciaire, de gendarmerie terrestre ou maritime, des gardes forestiers pour l'établissement des procès verbaux ou les reconstitutions de scènes de crime. Par exemple il s'agit de déterminer si tel pilote de motorcycle ou d'aéronef avait à une date donnée et en un lieu précis le Soleil dans les yeux ou non. Il s'agit aussi de prédire les mêmes conditions d'éclairage pour la reconstitution de scène de crime.

Voici quelques exemples de questions traitées en 2006 qui attestent de la diversité des demandes :

Question d'un particulier :

Sur le calendrier des postes on trouve les lettres QT, JA, A, JS, VS, SS, SC. Quelle est leur signification?

Le jour le plus court est le 21/12 mais c'est le 12/12 que le Soleil se couche le plus tôt et le 31/12 qu'il se lève le plus tard; pourquoi?

Question d'un professionnel :

Saint-Petersbourg : à l'aide de ces inscriptions pouvez-vous m'aider à dater cette horloge?

Pouvez-vous me donner l'état de la météo les 7 brumaire an X, 5 frimaire an XI les 10 20 et 24 germinal an XI ?

Question d'un institutionnel :

Commission Européenne: je m'adresse à vous dans le but d'obtenir des précisions concernant la Conférence internationale de l'Heure à Paris, Octobre 1913. En particulier je souhaiterais recevoir les actes et les principales conclusions de ladite Conférence.

Le volume des demandes à traiter varie en fonction de la sensibilisation du public aux événements astronomiques par les grands médias de la presse écrite, radiophonique et télévisée. On constate des pointes d'intérêt lors des événements exceptionnels tels que les éclipses totales de Soleil, les passages de Mercure et de Vénus devant le Soleil ou les oppositions de Mars.

Exemples de diffusion d'Arnold avec convergence vers un mouvement brownien

David Sauzin

Je me propose ici de rendre compte d'un travail en cours de rédaction [1], qui s'inscrit dans le prolongement de deux articles écrits en collaboration avec Jean-Pierre Marco [2] et [3]. Pour un survol de ces deux articles, on pourra se reporter aux textes [4] et [5] écrits à l'occasion des deux précédentes éditions des *Journées scientifiques de l'IMCCE*.

1. Hamiltoniens presque intégrables de classe Gevrey.

Rappelons brièvement le cadre de travail (on trouvera plus de détails dans [5]). Un système hamiltonien est un champ de vecteurs particulier, de la forme

$$\frac{dI_j}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial \theta_j}(I_1, \dots, I_N, \theta_1, \dots, \theta_N, t), \quad \frac{d\theta_j}{dt} = \frac{\partial H}{\partial I_j}(I_1, \dots, I_N, \theta_1, \dots, \theta_N, t),$$

avec des variables réelles I_1, \dots, I_N (les "actions") et des variables angulaires $\theta_1, \dots, \theta_N$ (les "angles"), la fonction H étant supposée assez régulière (\mathcal{C}^∞ de classe Gevrey). Nous autorisons la fonction H à dépendre du temps t (le champ de vecteurs est donc non autonome), mais de façon périodique. L'espace de phases est $\mathbb{R}^N \times \mathbb{T}^N$, l'ensemble des états (I, θ) dans lequel le système peut se trouver (\mathbb{R}^N pour les N -uplets d'actions $I = (I_1, \dots, I_N)$, $\mathbb{T}^N = \mathbb{R}^N / 2\pi\mathbb{Z}^N$ pour les N -uplets d'angles $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_N)$). Chaque condition initiale $x_0 = (I(0), \theta(0))$ détermine une unique trajectoire $t \mapsto x(t) = (I(t), \theta(t))$ dans l'espace de phases, comme indiqué sur la partie gauche de la figure 1.

Le système est dit presque intégrable lorsque H est proche d'une fonction h indépendante des angles :

$$H(I, \theta, t) = h(I) + f(I, \theta, t), \quad \varepsilon = \|f\| \ll 1,$$

c'est-à-dire que l'on considère f comme une petite perturbation, dont on mesure la taille à l'aide d'une norme $\|\cdot\|$ adaptée aux espaces de fonctions Gevrey d'indice $\alpha \geq 1$ (voir [5]). Nous choisissons ici

$$h(I) = h_0(I) = \frac{1}{2}(I_1^2 + \dots + I_N^2)$$

et nous voulons explorer la diversité des comportements dynamiques possibles, sachant qu'en l'absence de perturbation (lorsque $f = 0$), le système est parfaitement bien compris, avec en particulier $I(t) = I(0)$ pour toutes les solutions : les actions I_j sont des intégrales premières du système complètement intégrable défini par $h_0(I)$, dont toutes les solutions sont quasi-périodiques ($\theta(t) = \theta(0) + tI(0)$). Nous voudrions savoir à quel point les actions sont susceptibles de varier le long des trajectoires pour le système "perturbé" défini par $H = h_0 + f$: c'est la question de la "diffusion d'Arnold".

Il se trouve que, lorsque $\varepsilon = \|f\|$ est assez petit, le système défini par H hérite de h_0 des propriétés de stabilité assez fortes pour les variables d'action :

- D'après le théorème de Nekhoroshev, pour tout intervalle de temps $[t_1, t_2]$, $|I_j(t_2) - I_j(t_1)| \leq \text{const } \varepsilon^b$ si $t_2 - t_1 \leq \exp(\text{const } (\frac{1}{\varepsilon})^a)$: la variation des actions sur un temps exponentiellement long est faible, on parle donc de stabilité exponentielle (voir [4] ; on peut prendre $a = \frac{1}{2(N+1)\alpha}$ et $b = \frac{1}{2(N+1)}$).

- D'après la théorie KAM, beaucoup de conditions initiales donnent lieu à des trajectoires quasi-périodiques, pour lesquelles les actions varient très peu pendant un temps infiniment long ; si $N = 1$, cela entraîne que les actions varient très peu pendant un temps infiniment long pour *toutes* les solutions (voir [5], en prenant garde au décalage d'une unité pour le nombre de degrés de liberté dû au caractère non autonome : nous travaillons ici avec des systèmes à $N + \frac{1}{2}$ degrés de liberté, qui se comportent comme les systèmes à $N + 1$ degrés de liberté pour les questions de stabilité).

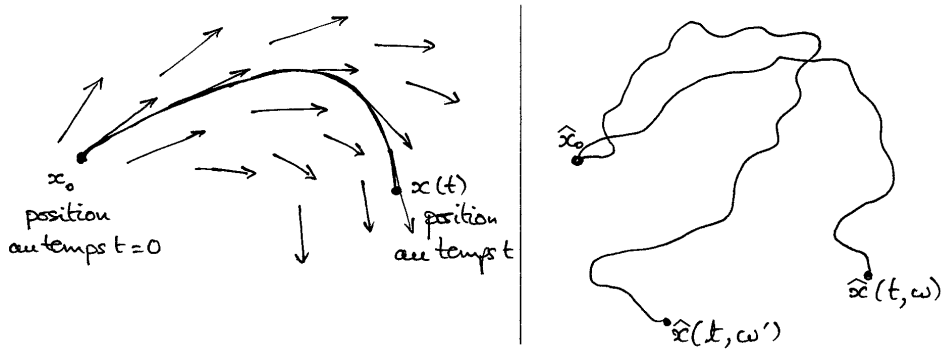


FIG. 1 – Trajectoires déterministes/aléatoires

Nous supposons donc $N \geq 2$ et notre objectif sera de donner des exemples de perturbations f qui soient arbitrairement petites en classe Gevrey, mais qui conduisent aux instabilités les plus grandes possibles, aux comportements les plus imprévisibles, les plus “chaotiques” possibles, quand bien même ε est arbitrairement proche de 0.

2. Diffusion d’Arnold. Point de vue probabiliste.

L’expression “diffusion d’Arnold” est employée à cause du célèbre article [6], dans lequel V. Arnold montrait dans un exemple simple ($N = 2$, $f = \varepsilon P$ avec P polynôme trigonométrique explicite—en particulier, cette perturbation f était analytique!) qu’il pouvait exister des trajectoires $t \mapsto (I(t), \theta(t))$ vérifiant $I_1(0) < 0$ et $I_1(\tau) > 1$ pour un certain temps τ , aussi petit que fût ε (mais le “temps d’instabilité” τ était nécessairement exponentiellement grand, ce qui est conforme au théorème de Nekhoroshev mentionné plus haut).

Arnold ne parlait que d’instabilité dans cet article; c’est Chirikov qui a utilisé le premier le vocable “diffusion” dans ce contexte (voir [7]). Sur la base d’arguments heuristiques et de simulations numériques, Chirikov décrivait en effet le mouvement $t \mapsto I(t)$ des variables d’action pour une perturbation typique et pour une condition initiale typique comme un processus de diffusion, au sens probabiliste du terme.

Le plus simple des processus de diffusion est le mouvement brownien, qui a notamment été étudié par Brown et Einstein d’un point de vue physique, et dont la définition et les propriétés mathématiques ont été mises au point par Norbert Wiener et Paul Lévy notamment. Le résultat principal de [1] est justement *la construction d’exemples de perturbation Gevrey f arbitrairement petite et de mesure de probabilité permettant d’établir, pour presque toute condition initiale, un lien entre le mouvement des $N-1$ premières variables d’action et le mouvement brownien dans \mathbb{R}^{N-1} .* Il est vrai que les perturbations f construites dans [1] et les mesures de probabilité utilisées ont un caractère quelque peu artificiel, mais il s’agit ici de fournir un énoncé mathématique précis et une démonstration rigoureuse; cela n’avait été jamais fait dans aucun exemple à ma connaissance.

Avant de détailler davantage le résultat obtenu, disons un mot sur la façon dont on peut concilier la nature a priori *déterministe* des champs de vecteurs hamiltoniens que nous étudions avec un point de vue *probabiliste*, dans lequel les phénomènes sont décrits en termes de processus stochastiques.

Il s’agira simplement pour nous de renoncer à une connaissance complète de l’état dans lequel se trouve le système, à l’instant initial comme aux instants ultérieurs; nous nous contenterons de spécifier les $N-1$ premières paires action-angle de la condition initiale,

$$\hat{x}_0 = (I_1(0), \dots, I_{N-1}(0), \theta_1(0), \dots, \theta_{N-1}(0)) \in \mathbb{R}^{N-1} \times \mathbb{T}^{N-1},$$

la dernière paire action angle $\omega = (I_N(0), \theta_N(0))$ jouant le rôle de variable cachée : on la supposera seulement distribuée selon une certaine mesure de probabilité P et on ne cherchera pas à en suivre l’évolution au cours du temps, on aura plutôt tendance à l’oublier dans la description du système.

La partie droite de la figure 1 illustre cela : pour une condition initiale partielle $\hat{x}_0 \in \mathbb{R}^{N-1} \times \mathbb{T}^{N-1}$, il y a plusieurs trajectoires possibles, correspondant aux différents choix possibles de $\omega = (I_N(0), \theta_N(0))$. Le système sous-jacent est toujours déterministe, mais il faut spécifier ω pour déterminer la trajectoire.

On peut donc considérer, pour chaque temps t ,

$$\hat{x}(t, \omega) = (I_1(t), \dots, I_{N-1}(t), \theta_1(t), \dots, \theta_{N-1}(t))$$

comme une variable aléatoire sur l'espace probabilisé $\Omega = (\mathbb{R} \times \mathbb{T}, P)$, à valeurs dans l'espace d'états $\mathbb{R}^{N-1} \times \mathbb{T}^{N-1}$ (étant entendu qu'on a fixé une fois pour toutes les $N - 1$ premières paires action-angle de la condition initiale). On peut aussi considérer $t \mapsto \hat{x}(t, \omega)$ comme un chemin continu issu de \hat{x}_0 qui dépend aléatoirement de $\omega \in \Omega$: chaque tirage d'un élément élémentaire ω détermine une trajectoire dans $\mathbb{R}^{N-1} \times \mathbb{T}^{N-1}$.

Nous nous intéresserons particulièrement à la projection sur le facteur \mathbb{R}^{N-1} de la trajectoire :

$$\hat{I}(t, \omega) = (I_1(t), \dots, I_{N-1}(t)).$$

En effet, nous savons bien que les angles sont appelés à évoluer de façon telle que nous en perdrons rapidement le contrôle, mais nous voulons savoir ce qui arrive aux $N - 1$ premières actions (forcées de rester immobiles en l'absence de perturbation, et contraintes d'évoluer exponentiellement lentement pour le système perturbé). Nous nous intéressons aux propriétés statistiques de $\hat{I}(t, \omega)$, sachant que la condition initiale est distribuée selon la loi de probabilité P . Nous verrons que pour certaines perturbations, le chemin aléatoire $t \mapsto \hat{I}(t, \omega)$ converge en loi vers un chemin brownien, moyennant un changement d'échelle approprié.

3. Description de l'exemple obtenu.

Notons $\mathcal{C}_{[0,1]}$ l'ensemble de tous les chemins continus $t \in [0, 1] \mapsto \gamma(t) \in \mathbb{R}$. On appelle "mouvement brownien réel standard" un chemin continu aléatoire $t \in [0, 1] \mapsto B(t) \in \mathbb{R}$ qui est distribué selon une certaine mesure de probabilité W définie dans $\mathcal{C}_{[0,1]}$, c'est-à-dire une variable aléatoire à valeurs dans $\mathcal{C}_{[0,1]}$ dont la loi est W .

La mesure de probabilité W est appelée mesure de Wiener ; elle est caractérisée par un certain nombre de propriétés qui modélisent bien ce qu'on attend d'un chemin "brownien" issu de l'origine :

- $B(0) = 0$;
- pour tout $t > 0$, $B(t)$ suit une loi gaussienne centrée de variance t , c'est-à-dire que la loi de $B(t)$ (qui est une variable aléatoire réelle) possède une densité, à savoir $\frac{1}{\sqrt{2\pi t}} \exp(-\frac{x^2}{2t})$;
- pour $0 \leq t_1 < t_2$, la variable aléatoire réelle $B(t_2) - B(t_1)$ (la variation de B sur l'intervalle de temps $[t_1, t_2]$) est indépendante de la trajectoire jusqu'à l'instant t_1 (caractère imprévisible du mouvement : la connaissance de la trajectoire avant l'instant t_1 n'apporte aucune information de plus que celle que donne la position au temps t_1) ; de plus, $B(t_2) - B(t_1)$ a même loi que $B(t_2 - t_1)$.

On appelle mouvement brownien en dimension d un chemin continu $t \in [0, 1] \mapsto B(t) = (B_1(t), \dots, B_d(t)) \in \mathbb{R}^d$ obtenu en considérant d copies indépendantes d'un mouvement brownien réel (c'est donc une variable aléatoire à valeurs dans $\mathcal{C}_{[0,1]}^d$, dont la loi est le produit indépendant de d copies de W).

Le résultat principal de [1] peut être formulé de la façon suivante : *pour tout $N \geq 2$, il existe une fonction Gevrey $f(I, \theta, t)$ arbitrairement petite et une mesure de probabilité P sur $\mathbb{R} \times \mathbb{T}$ telles que, pour le système hamiltonien défini par $H = h_0(I) + f(I, \theta, t)$ et pour presque tout $\hat{x}_0 = (\hat{I}_0, \hat{\theta}_0) \in \mathbb{R}^{N-1} \times \mathbb{T}^{N-1}$, la trajectoire déterminée par la condition initiale (\hat{x}_0, ω) (où $\omega \in \mathbb{R} \times \mathbb{T}$ est distribué selon P) vérifie*

$$\frac{1}{\sqrt{n}} \hat{I}(nt) \xrightarrow{\mathcal{L}} \sigma B(t),$$

où σ est une constante positive, $B(t)$ est un mouvement brownien en dimension $N - 1$ et le symbole $\xrightarrow{\mathcal{L}}$ représente la convergence en loi d'une suite de variables aléatoires à valeurs dans $\mathcal{C}_{[0,1]}^{N-1}$ (c'est-à-dire que la loi de $t \in [0, 1] \mapsto \frac{1}{\sigma\sqrt{n}} \hat{I}(nt)$ converge faiblement vers le produit indépendant de $N - 1$ copies de W quand n tend vers l'infini).

La division par \sqrt{n} peut faire penser au théorème de la limite centrale, qui est d'ailleurs effectivement vérifié par \hat{I} , comme cas particulier de la formule précédente avec $t = 1$: les $N - 1$ premières actions se distribuent asymptotiquement au temps $n \gg 1$ comme des gaussiennes centrées indépendantes de

variance $\sigma^2 n$. Mais on a mieux que cela : tout le morceau de trajectoire correspondant à la fenêtre temporelle $[0, n]$ a une projection sur \mathbb{R}^{N-1} qui, après changement d'échelle, se distribue asymptotiquement comme un chemin brownien.

Dans [1] sont aussi discutées les propriétés ergodiques du flot engendré par $H = h_0 + f$. On peut définir sur l'espace de phases une mesure invariante pour le flot au temps q , où q est un entier qui représente une échelle de temps caractéristique pour notre système¹ : il s'agit de la mesure μ obtenue en considérant indépendamment la mesure de Lebesgue² sur $\mathbb{R}^{N-1} \times \mathbb{T}^{N-1}$ et la mesure de probabilité P sur le facteur $\mathbb{R} \times \mathbb{T}$. On trouve que μ est ergodique dans les exemples construits avec $N = 2$ ou 3 , ce qui entraîne que presque toute condition initiale donne lieu à une orbite dense en projection sur $\mathbb{R}^{N-1} \times \mathbb{T}^{N-1}$. Ce n'est plus le cas si $N \geq 4$, mais les propriétés du mouvement brownien en dimension $d \geq 3$ permettent de montrer que presque toute condition initiale donne lieu à une trajectoire qui tend vers l'infini lorsque le temps tend vers l'infini (il existe encore des conditions initiales donnant lieu à une orbite dense, mais elles sont "moins nombreuses" que lorsque $N = 2$ ou 3).

La méthode pour construire ces exemples consiste à se ramener, par une technique empruntée à [3] (et en utilisant un changement d'échelle en actions et en temps qui fait intervenir le paramètre q susmentionné), à un système dynamique discret pour les $N - 1$ premières paires action-angle. Pour $N = 2$, ce système discret peut être vu comme l'itération aléatoire de trois "applications standards" : la donnée de la variable ω est équivalente à la donnée d'une suite de symboles ω_n pouvant prendre les valeurs 1 ou -1 ou 0 avec la même probabilité et de façon indépendante, et la dynamique entre le temps $n - 1$ et le temps n est décrite par la formule

$$(I_1, \theta_1) \mapsto (I_1 + \omega_n \cos(\theta_1 + 2\pi I_1), \theta_1 + 2\pi I_1)$$

Si par exemple on part de la condition initiale $\hat{x}_0 = (I_1(0), \theta_1(0)) = (0, 0)$, on trouve par récurrence $\theta_1(n) = 0 \pmod{2\pi}$ et $I_1(n) = I_1(n-1) + \omega_n \in \mathbb{Z}$, c'est-à-dire une marche aléatoire standard, d'où

$$I_1(n) = \omega_1 + \dots + \omega_n.$$

Plus généralement, $I_1(n)$ vérifie une propriété dite de "martingale" (une sorte de marche aléatoire généralisée), qui est la clé de la démonstration.

Références

- [1] D. Sauzin, "Examples of Arnold diffusion with convergence to a Brownian motion and infinite ergodic measure," *en préparation*.
- [2] J.-P. Marco, D. Sauzin, "Stability and instability for Gevrey quasi-convex near-integrable Hamiltonian systems," *Publications Mathématiques de l'Institut des Hautes Études Scientifiques*, vol. **96**, p. 199–275, 2002.
- [3] J.-P. Marco, D. Sauzin, "Wandering domains and random walks in Gevrey near-integrable systems," *Ergodic Theory & Dynamical Systems* Vol. **24**, 5 (volume spécial à la mémoire de M. Herman, édité par A. Fathi et J.-C. Yoccoz), p. 1619–1666, 2004.
- [4] D. Sauzin, "Séries Gevrey et théorème de Nekhoroshev," *Journées scientifiques 2000 de l'Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides*, Notes scientifiques et techniques de l'Institut de Mécanique Céleste **S076**, p. 145–147, juin 2001.
- [5] D. Sauzin, "Exemples non analytiques de diffusion d'Arnold," *Journées scientifiques 2003 de l'Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides*, Notes scientifiques et techniques de l'Institut de Mécanique Céleste **S081**.
- [6] V. I. Arnold, "Instability of dynamical systems with several degrees of freedom," *Dokl. Akad. Nauk SSSR* **156** (1964), 9–12; *Soviet Math. Dokl.* **5** (1964), 581–585.
- [7] B. V. Chirikov, "A universal instability of many-dimensional oscillator systems," *Physics Reports* **52**, no. 5 (1979), 263–379.

¹En fait, q est exponentiellement grand par rapport à ε , et la constante σ qui intervient dans la formule ci-dessus n'est autre que $q^{-3/2}$. Cette constante s'appelle "coefficient de diffusion" ; son exponentielle petitesse est une manifestation du théorème de Nekhoroshev.

²c'est-à-dire le volume usuel — on prendra garde au fait que le volume total est infini, la mesure μ ne peut donc pas être normalisée de façon à devenir une mesure de probabilité.

Spectroscopy and photometry of 21 Lutetia - target of ESA's space mission Rosetta

Dan Alin Nedelcu
Astronomical Institute of the Romanian Academy

Abstract

In July 2010 Rosetta mission will flyby its second and largest science target - asteroid 21 Lutetia. Previously classified as M-type asteroid, it was shown recently that its spectrum is unusual flat and moreover it resembles the spectra of carbonaceous chondrites characterizing C-type asteroids. In the framework of ground observations campaign needed to improve the knowledge of mineralogical and physical characteristics of Lutetia we present the latest near IR observations in 0.8-2.5 μm interval carried out in remote mode from CODAM (Meudon, France) in April 2006 using the 3m aperture telescope IRTF located in Mauna Kea. With another two oppositions left until the flyby, a campaign of systematic near IR spectroscopic observations to map the entire lightcurve (8.165 h) and further refine the mineralogical properties of Lutetia by investigating any surface inhomogeneity can be prepared.

1. Introduction

The ESA's flagship Rosetta spacecraft designed to investigate the comet 67P/Churyumov - Gerasimenko will include two asteroid flyby - 2867 Steins on September 2008 and 21 Lutetia on July 2010. Lutetia being the largest is the only among mission's target which will allow to obtain by Radio Science Investigation the mass determination and a density estimation.

Because of its high IRAF albedo Lutetia was previously classified as M-type (Barucci et al. 1987) and (Tholen 1989), but later observations (Howell et al. 1994, Burbine & Binzel 2000) have shown that its infrared spectrum is unusually flat for the M type asteroids. Recent near-IR observations (Birlan et al. 2004) lead to similar results, finding in the 0.8-4.0 μm range an overall neutral trend with a shallow absorption line around 0.95 μm suggesting a similarity with the carbonaceous chondrite spectra which characterize C-type asteroids.

The C-type classification of Lutetia was reinforced in (Birlan et al. 2006) where a good fit with the spectrum of Vigarano - a CV3 carbonaceous chondrite meteorite was derived and further, by measuring the reflectance ratios $R_{2.9\mu}/R_{2.5\mu}$ and $R_{3.2\mu}/R_{2.5\mu}$ of Lutetia, values similar with those of CV and CO meteorites were found. This results together with the previous ones in agreement with the carbonaceous chondrite analogy: the polarimetric properties (Belskaya & Lagerkvist 1996), the lower radar albedo (Magri et al. 1999) and the 3 μm absorption line of water of hydration (Rivkin et al 2000) are consistent with a primitive composition of Lutetia placing it within the science objectives of the mission - the investigation of early Solar System.

Further near IR spectroscopic observations during the next two oppositions until the flyby should clarify the mineralogical properties of Lutetia.

2. Photometry

Asteroid 21 Lutetia was discovered at the Paris Observatory in 1852 by H. Goldschmidt. Having a IRAF diameter of 95.5 ± 4.1 km it was the largest out of the possible candidates for the mission. The main physical and orbital characteristics are listed in Table 1. The rotational period of 8.17 ± 0.01 h was determined by Zappala et al (1984). There are for now two pole solution in good agreement, computed from radar observations, and lightcurves inversion method. From all the available lightcurves Torppa et al. (2003) computed pole coordinates and found that Lutetia is characterized by sharp and irregular shape features with rough global dimensions $a/b = 1/2$, $b/c = 1/2$ and no albedo variegation (Fig. 1). Having the asteroid shape model from Torppa et al. (2003) a ray-tracing software like POV-Ray coupled with a image analysis software based on Open Source graphics libraries was used to generate synthetic optical lightcurve (Fig. 2) for various viewing geometries.

Semimajor axis (UA)	2.435
Eccentricity	0.164
Inclination (deg)	3.064
Taxonomic type	C (or M)
Rotation period (h)	8.17 ± 0.01
Absolute magnitude	7.294
Slope parameter	0.110
IRAS diameter (km)	95.5 ± 4.1
IRAS albedo	0.221 ± 0.02
Pole solution from radar observation (Magri et al. 1999)	$\lambda_1 = 228^\circ \pm 11, \beta_1 = 13^\circ \pm 5$ $\lambda_2 = 48^\circ \pm 11, \beta_2 = 5^\circ \pm 5$
$2a \times 2b \times 2c$	$130 \times 104 \times 74$
Pole solution from lightcurve analysis (Torppa et al. 2003)	$\lambda_1 = 220^\circ \pm 10, \beta_1 = 3^\circ \pm 10$ $\lambda_2 = 39^\circ \pm 10, \beta_2 = 3^\circ \pm 10$
$a/b, b/c$	1.2, 1.2

Table 1: Orbital and physical characteristics of 21 Lutetia

In order to obtain the synthetic light curve of the asteroid, 360 images 1° apart have been generated using the ray-tracing software and then analyzed in batch mode to extract for each of them the corresponding "flux". The entire procedure has been repeated for different viewing and illumination angles. The synthetic lightcurves reproduce well the real ones, with 2 pairs of extrema strongly defined, a maximum amplitude $\sim 0.24m$ in the equatorial view at phase angle 0, and $\sim 0.18m$ lightcurve amplitude in the second configuration.

The usefulness of this procedures becomes evident when trying to connect photometrical and spectroscopic observations of asteroids. With a shape model made available, an asteroid spectrum can be precisely placed on the lightcurve and the observation time can be choose to obtain mineralogical information from a precise "hemisphere" of the asteroid or, in the simplest case, around lightcurve maxima in order do achieve a maximum SNR for the spectrum.

Same considerations apply for the modelization of the binary systems when is required to obtain spectra of just one component during the mutual events and a simultaneous photometric survey is not always available.

3. Spectroscopy

The asteroid was observed two times in 17 and 19 April 2006 using the 3-m aperture telescope IRTF located on Mauna Kea by means of the spectrograph SpeX. The observations were performed in remote observing mode from Centre d'Observation a Distance en Astronomie de Meudon (CODAM). Low resolution Prism mode of the spectrograph was used in the $0.8\text{-}2.5 \mu\text{m}$ spectral interval with a 0.8×15 arcsec slit oriented North-South, and the spectra of the asteroid and the solar analogs were obtained alternatively on two distinct location on the slit (referred to as A and B beam).

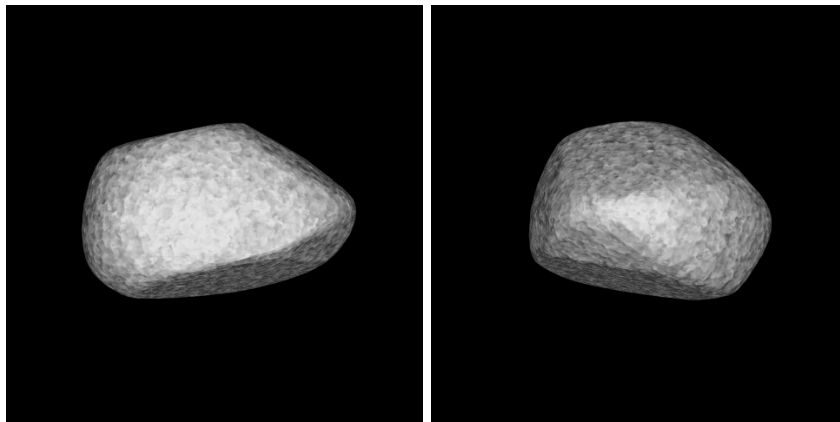


Fig. 1. Shape model of 21 Lutetia in equatorial viewing/illumination geometry with rotational phases 90° apart (cratered texture added).

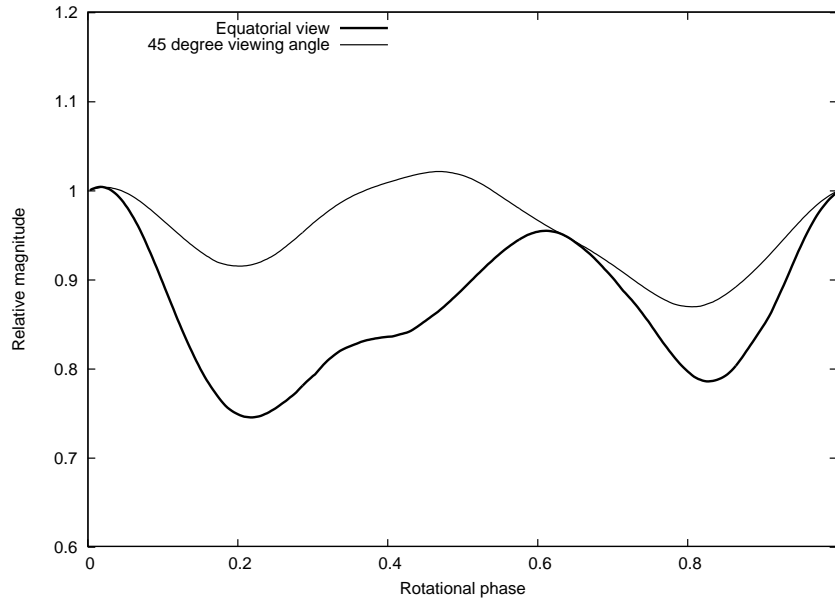


Fig. 2. Synthetic lightcurve of 21 Lutetia obtained in equatorial viewing geometry and for 45° viewing angle at 0 phase angle

The spectra were acquired in good condition (seeing 0.9") with asteroid close to the zenith (airmass of 1.03) and the solar analog stars at similar airmasses - HD 87680 at 1.05 airmass on 17 April and HD76332 for 19 April at an airmass of 1.02. The total integration time was 600s for the asteroid and 120s for the solar analog stars.

The data reduction process consists in two main steps: 1) obtaining the raw spectra for object and solar analog stars and 2) computation of normalized reflectance spectrum by dividing the above obtained spectra and performing the telluric lines correction.

For the first step Image Reduction and Analysis Facility (IRAF <http://iraf.noao.edu>) was used in conjunction with a script that acts like a wrapper over the real IRAF set of instructions. Based on some assumptions over the file names, the script will group together the flat fields images and those for every star or/and asteroids having the advantage that the reduction procedure should be run only once for the entire data gathered in one night of observations, and not for each asteroid - reference stars combination.

In more details the script first extracts from the entire 1kx1k frame the region containing the spectrum, then computes a bad pixels map and a master flat frame to apply the corrections.

Images in A and B positions of the slit are then paired and subtracted to minimize the sky background and telescope influence. From the newly obtained images containing both a negative and a positive spectrum one-dimensional spectra are extracted, and wavelength calibration using an Argon lamp spectrum is done. After comparing wavelength scales for A and B beams and computing the average shift between the two, the images are trimmed so only the positive half of them is retained and scaled to achieve peak data value.

User defined groups of asteroids and reference stars taken at similar airmasses are combined and single one-dimensional spectra are extracted for each of the groups. Applying the wavelength calibration to all groups spectra concludes the first step of the reduction procedure. It is worth noting that each of the above steps involves running the script with different options to generate Command Language (CL) script that are run into the IRAF environment.

The second step of the reduction relies on IDL procedures and makes use of ATRAN model (Lord 1992) to correct for telluric absorption. Final spectra obtained for each group in the previous step are paired with values of zenith angles and each asteroid spectrum is divided by each reference star spectrum to obtain the final normalized reflectance spectrum. Additionally cross dividing only the reference stars spectra should be performed and checked for any important slope variation in the normalized reflectance spectrum that could artificially induce spectral variation in asteroid spectra taken in different times.

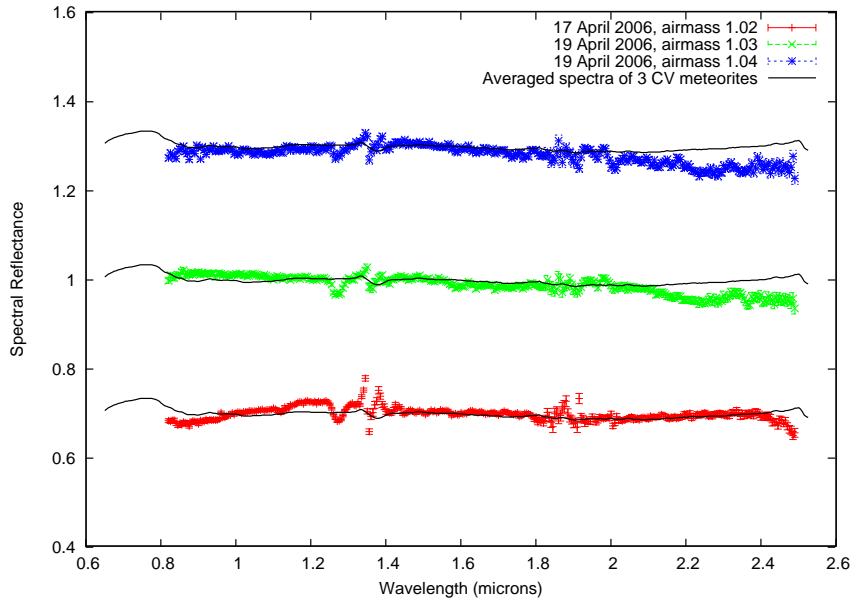


Fig. 3. 3 Spectra of 21 Lutetia obtained in two nights at similar airmass. An average spectra of 3 carbonaceous chondrites meteorites is superimposed. All spectra are normalized at 1.5 microns and shifted for visibility

The ratio between the spectrum of 21 Lutetia and the corresponding solar analog star are presented in Fig. 3 together with a spectrum obtained by averaging the spectra of 3 meteorites classified as CV3, belonging to the category of carbonaceous chondrite. In the region 0.8-2.5 μm , the spectrum is flat with an almost neutral trend, in good agreement with those published by Birlan et al. (2004, 2006). The obtained spectrum is well fitted with the average spectrum of 3 CV-type meteorites - Grosnaja, Vigarano and Leoville.

4. Conclusion

The latest near-IR spectra of 21 Lutetia acquired on 17 and 19 April 2006 reinforced the link between the mineralogy of the surface of 21 Lutetia and the CV3 type meteorites. A good fit with the spectrum of 3 CV-type meteorites was found. All the information available for Lutetia are consistent with a primitive composition, except the higher IRAS albedo value. However with the albedo of 0.208 ± 0.025 reconfirmed recently by Mueller et al. (2006), value incompatible with the lower albedo of C-type asteroids, 21 Lutetia still remain a peculiar object. With another two oppositions left until the flyby, a campaign of systematic near IR spectroscopic observations to map the entire lightcurve (8.165 h) and further refine the mineralogical properties of Lutetia by investigating any surface inhomogeneity could address this issue.

Acknowledgments. The authors acknowledge Mirel Birlan for useful comments concerning the manuscript and the collaboration with the Institut de Mecanique Celeste et de Calcul des Ephemerides (IMCCE) of Paris Observatory. This article is based on observations acquired with IRTF telescope and CODAM facilities and utilizes spectra acquired by Hiroi, Pieters, and Gaffey, with the NASA RELAB facility at Brown University. The work of author was supported by the ESA grant RES-H/3006.

References

- Barucci, M. A., Capria, M. T., Coradini, A., & Fulchignoni, M. 1987, *Icarus*, 72, 304
- Belskaya, I. N., & Lagerkvist, C.-I. 1996, *PSS*, 44, 783
- Birlan, M., Barucci, M. A., Vernazza, P., et al. 2004, *New Astron.*, 9, 343
- Birlan, M., Vernazza, P., Fulchignoni, M., et al. A&A preprint doi <http://dx.doi.org/10.1051/20054460>
- Burbine, T. H., & Binzel, R. P. 2002, *Icarus*, 159, 468
- Howell, E. S., Merenyi, E., & Lebofsky, L. A. 1994, *J. Geo. Res.*, 99, 10848

Magri, C., Ostro, S. J., Rosema, D. K., et al. 1999, *Icarus*, 140, 379
Mueller, M., Harris, A. W., Bus, S. J., et al. 2006 *A&A* 447, 1153
Rivkin, A. S., Howell, E. S., Lebofsky, L. A., et al. 2000, *Icarus*, 145, 351
Tholen, D. 1989, in *Asteroids II* (Univ. of Arizona Press), 1139
Torppa, J., Kaasalainen, M., Michalowski, T., et al. 2003, *Icarus*, 164, 346
Zappala, V., Di Martino, M., Knezevic, Z., et al. 1984, *A&A*, 130, 208

Évolution des moyens informatiques communs de l'IMCCE

Julien Lecubin

Introduction

L'objectif de cette note est de présenter les évolutions futures qui auront lieu au cours des prochains mois au niveau des moyens informatiques communs du laboratoire. Les sujets suivants seront abordés :

- La sauvegarde
- Le DNS
- La politique de sécurité
- Le service d'authentification
- Le VPN

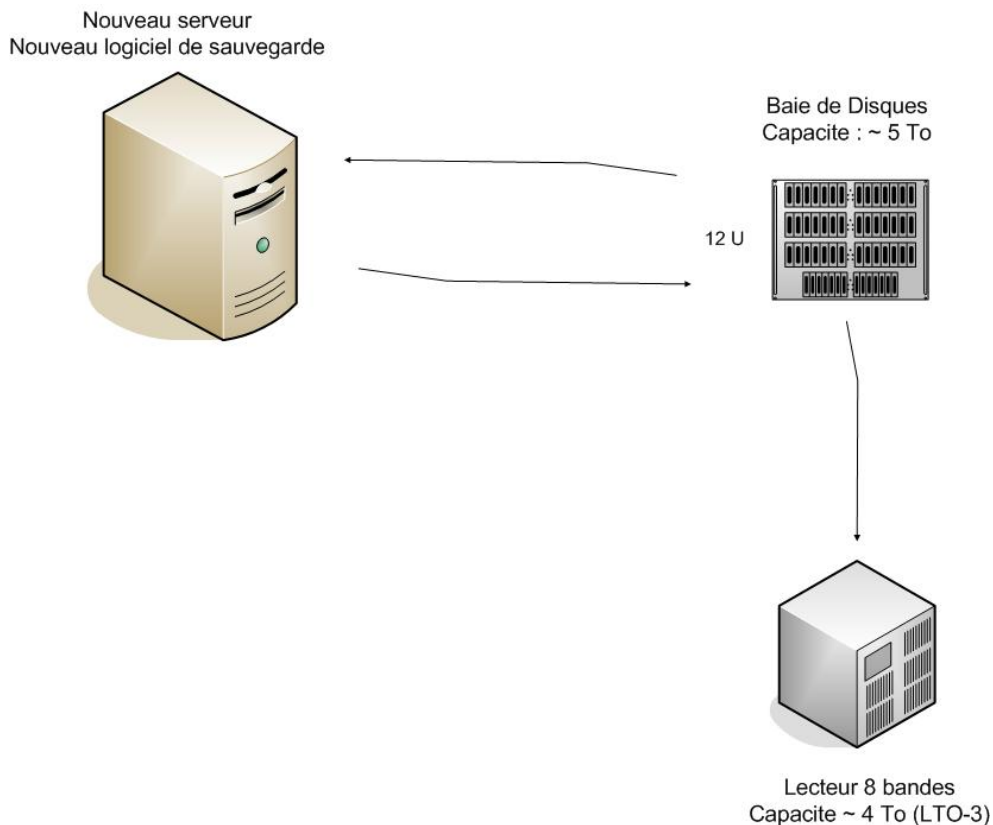
1. La sauvegarde

Une partie importante du budget informatique sera consacrée pour l'année 2006 à la mise en place d'une nouvelle solution de sauvegarde des données informatiques.

Le laboratoire est actuellement équipé de 21 serveurs et d'un espace de données utiles de 1,5 To (données utilisateurs + données propres aux systèmes d'exploitations).

La solution de sauvegarde actuelle comporte plusieurs inconvénients :

- la sauvegarde des données est effectuée sur une librairie de bandes d'une capacité utile d'environ 350 Go. Etant donné la capacité du robot, uniquement les données jugées importantes sont sauvegardées.
- la version logicielle de la solution de sauvegarde sur le serveur et sur les clients est supérieur à 5 ans.
- la phase de sauvegarde/restauration des données depuis la librairie de bandes est lente



Une nouvelle solution de sauvegarde est en cours d'étude. Elle doit permettre d'assurer la sauvegarde de l'ensemble des 21 serveurs (données utilisateurs + données propres aux systèmes d'exploitations) tout en prenant en compte l'évolution des zones de données au cours des prochaines années.

La nouvelle solution de sauvegarde intégrera :

- un serveur dédié qui assurera la procédure de sauvegarde de l'ensemble des serveurs
- une baie de disques de grosse capacité afin de pouvoir effectuer rapidement la sauvegarde et la restauration des données (5 To minimum)
- un robot de sauvegarde de type LTO-3 qui assurera la sauvegarde des données sur bandes (4 To minimum)
- la jouvence logicielle de la solution de sauvegarde au niveau du serveur et des clients.

2. Le DNS

Trois zones de nommage fonctionnent actuellement sur le réseau :

- La zone principale imcce.fr
- La zone historique bdl.fr encore utilisée pour identifier le serveur internet via l'URL www.bdl.fr
- Une nouvelle zone est maintenant activée : imcce.eu. Ce domaine permet au laboratoire d'offrir une visibilité à caractère européen via une troisième URL pour son site internet : www.imcce.eu

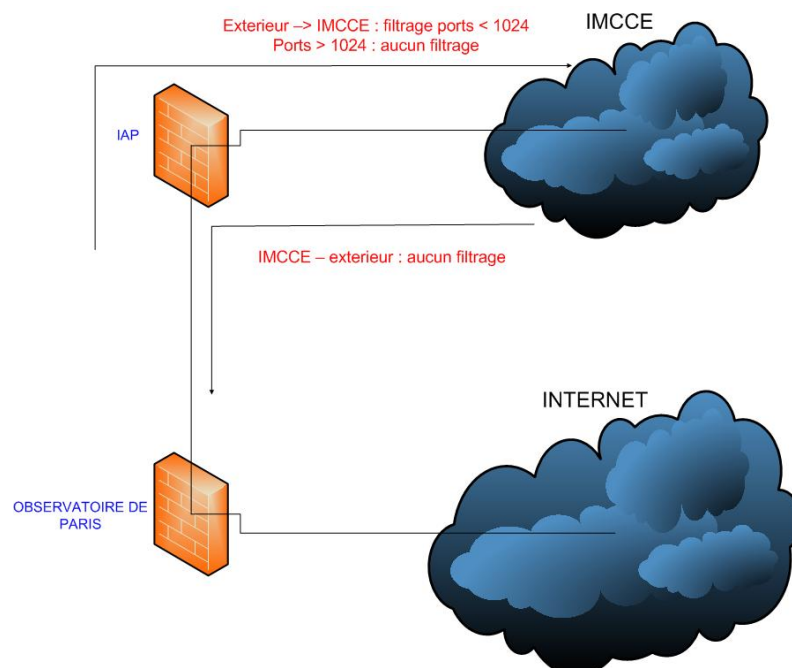
3. La politique de sécurité

Les paquets échangés entre le réseau du laboratoire et l'extérieur transitent par le routeur de l'IAP chargé de filtrer les paquets. Plus précisément, le routeur analyse les informations suivantes de chaque paquet qu'il voit transiter en provenance et à destination du réseau du laboratoire :

- adresse ip de la machine émettrice
- adresse ip de la machine réceptrice
- type de paquet (TCP/UDP etc...)
- numéro de port

Les adresses ip contenues dans les paquets permettent d'identifier la machine émettrice et la machine cible, tandis que le type de paquet et le numéro de port donnent une indication sur le type de service utilisé.

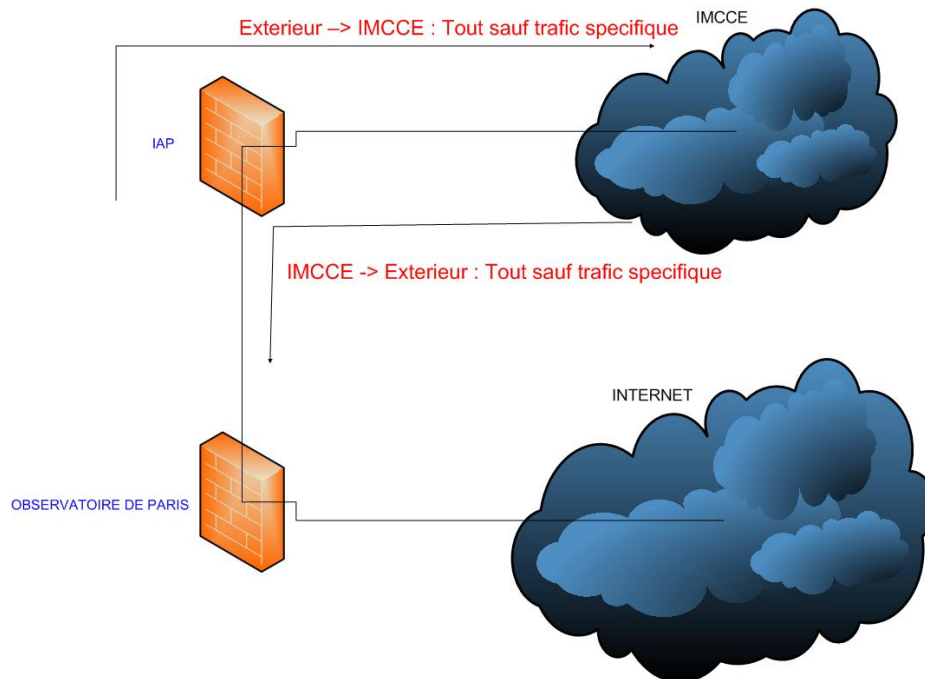
Actuellement la politique de filtrage appliquée sur le routeur de l'IAP pour notre réseau est la suivante :



concernant le flux **imcce** -> **extérieur** : application d'un filtrage sur des ports reconnus (<1024) associés aux services courants (http, ftp, ssh, smtp, imap ...)
concernant le flux **imcce** -> **internet** : aucun filtrage n'est réalisé

Les attaques informatiques montrent que la source ne provient pas forcément que de l'extérieur. En effet, l'introduction dans le réseau du laboratoire de portables infectés par des programmes malveillants ou de serveurs compromis peut poser problème (plaintes diverses par des administrateurs systèmes ou mail de RENATER nous notifiant une attaque en provenance de notre réseau).

Pour faire face à ces problèmes, l'idée est d'appliquer une politique de filtrage plus restrictive :



concernant le flux **extérieur** -> **imcce** : tout est filtré sauf les services fondamentaux (http,ftp, ssh, smtp, imap... sur les serveurs dédiés)

concernant le flux **imcce** -> **extérieur** : tout est filtré sauf les services fondamentaux (http,ftp, ssh, smtp, imap...)

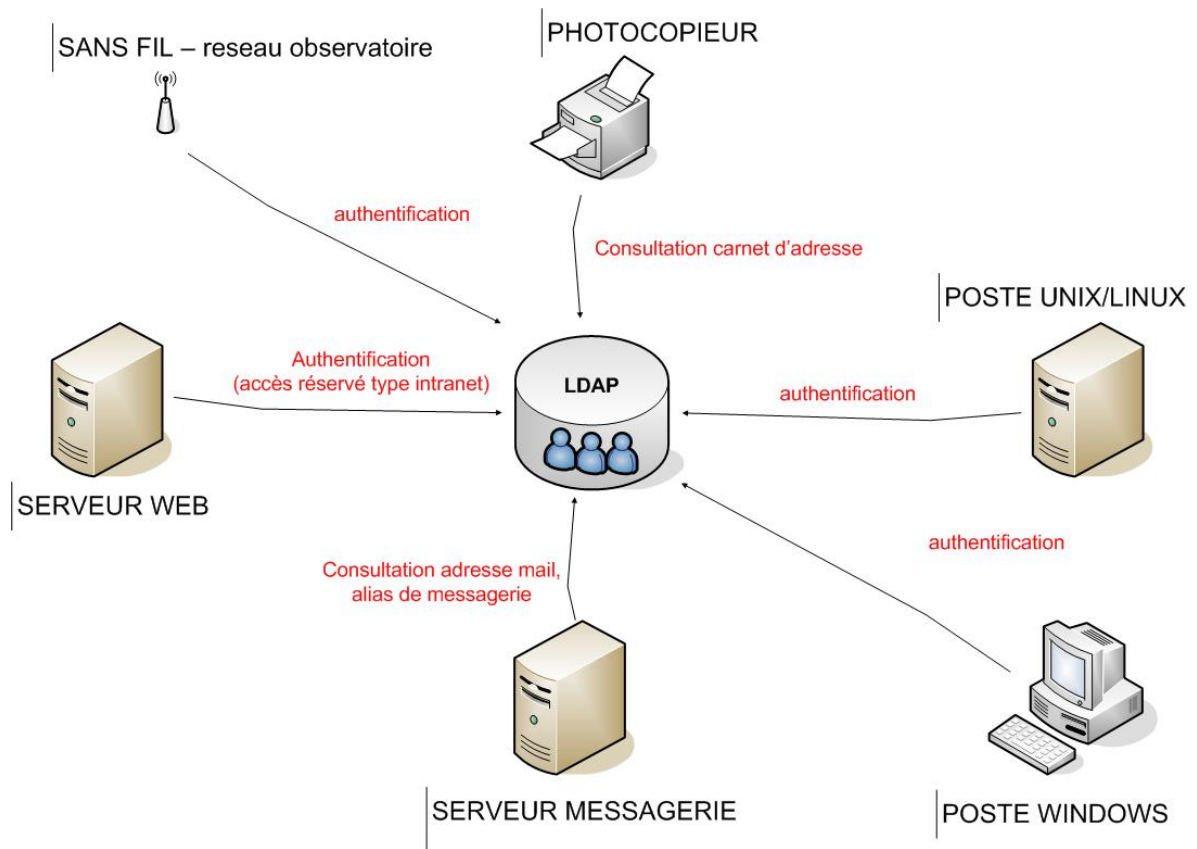
4. Le service d'authentification

La situation en 2003 reposait sur un système d'authentification utilisateur basé sur NIS (Network Information Service) qui comportait des informations du type *login/mot de passe/uid/gid* Unix. Cette architecture propre au monde Unix n'apportait pas de solution sur un système d'authentification standard capable à la fois d'authentifier les utilisateurs du monde Unix et du monde Windows.

Il a donc été décidé de mettre en place un annuaire LDAP afin de répondre à ce problème. En plus de fournir un système d'authentification compatible sur l'ensemble des serveurs, l'annuaire LDAP nous offrait d'autres possibilités :

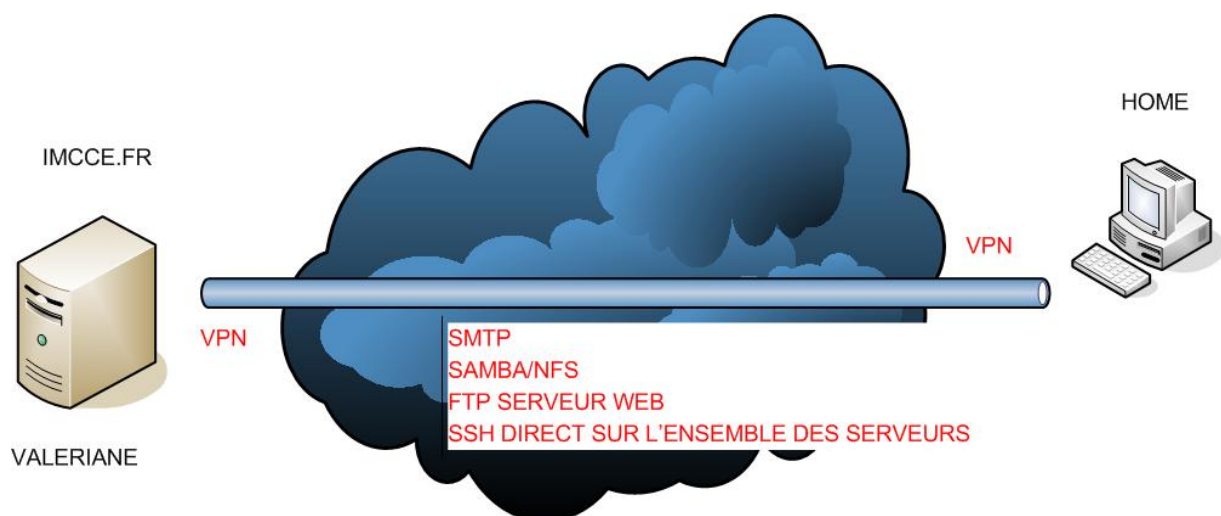
- Les clients de messagerie et les photocopieurs peuvent interroger un annuaire LDAP pour y puiser leur carnet d'adresses.
- Le serveur de messagerie peut s'appuyer sur l'annuaire LDAP pour y vérifier l'adresse mail ou l'alias d'un utilisateur.
- Une majorité de solutions logicielles savent utiliser LDAP pour l'authentification (apache pour l'accès à la zone intranet par exemple)
- L'annuaire LDAP peut être consulté pour authentifier un utilisateur du laboratoire qui accède au réseau sans fil depuis le réseau de l'observatoire

Nous avons donc décidé de mettre en oeuvre l'architecture suivante :



5. Le VPN

Un VPN (Virtual Private Network) permet de connecter de façon sécurisée des ordinateurs distants au travers d'une liaison non fiable (Internet), comme s'ils étaient sur le même réseau local. Nous avons décidé d'étudier une solution de ce type pour le laboratoire :



Les avantages d'une solution VPN dans notre environnement :

- un accès au réseau du laboratoire à distance depuis n'importe quel réseau extérieur et de façon sécurisée
- un accès aux ressources du laboratoire (montage samba ou netbios des zones de données)
- des connexion ssh/ftp directement sur n'importe quelle machine du laboratoire
- la possibilité d'utiliser le serveur smtp du laboratoire.

Le choix s'est porté sur une solution gratuite appelée openVPN compatible sous Linux, Windows et Mac OS X.

Les tests ont récemment montrés qu'il était possible :

- d'authentifier l'utilisateur sur le serveur VPN par le biais de son certificat CNRS
- monter les zones de données utilisateurs à distance dans les environnements Linux et Windows via samba
- effectuer un ssh/ftp directement sur n'importe quelle machine du laboratoire
- utiliser le serveur smtp du laboratoire.

Index des auteurs

Andrei A.H.	1	Marchis F.	45
Arlot J.-E.	81, 111, 125	Mignard F.	91
Assafin M.	45, 51	Montintin A.	31
Bakabadio Ch.	77	Morin G.	101
Berthier J.	77, 81	Mouret S.	91
Birlan M.	87, 119	Nedelcu A.	133
Chenciner A.	15	Nicolas I.	19
Derouazi Th.	107	Normand J.	87
Descamps P.	45, 51, 77	Noyelles B.	71
Desmars J.	95	Robert V.	125
Duhamel Ph.	127	Rocher P.	9, 127
Duriez L.	65	Sauzin D.	129
Emelianov N.	23	Simon J.-L.	87
Féjoz J.	15	Thuillot W.	81, 87
Fienga A.	87	Touchet L.	61
Gastineau M.	57	Vachier F.	81
Hestroffer D.	33, 91	Varfolomeev M.	23
Lainey V.	29, 81, 125	Vieira Martins R.	51
Lecubin J.	139	Vienne A.	41, 71
Lemaître S.	37		

