



Etude dynamique et observationnelle des astéroïdes de la ceinture principale

Damya Souami

► **To cite this version:**

Damya Souami. Etude dynamique et observationnelle des astéroïdes de la ceinture principale. Astrophysique galactique [astro-ph.GA]. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2012. Français. <NNT : 2012PAO66543>. <tel-00834377>

HAL Id: tel-00834377

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00834377>

Submitted on 14 Jun 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**THÈSE DE DOCTORAT DE
L'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE**

Spécialité

Mécanique céleste

École doctorale

ED127 ASTRONOMIE ET ASTROPHYSIQUE ILE DE FRANCE

Présentée par

Damya SOUAMI

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR de l'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE

Sujet de la thèse :

**Etude dynamique et observationnelle des astéroïdes de la
ceinture principale.**

soutenue le 07 Décembre 2012

devant le jury composé de :

M. Alberto CELLINO	Rapporteur
Pr. Rudolf DVORAK	Rapporteur
Pr. Bruno SICARDY	Examineur
M. Mirel BIRLAN	Examineur
M. Jan VONDRAK	Examineur
Pr. Anne LEMÂÎTRE	Co-directrice scientifique de thèse
M. Jean SOUCHAY	Directeur de thèse

©Damya SOUAMI

À ma grand-mère Z.A. SOUAMI (1907-1996), qui m'a toujours encouragée à poursuivre mes rêves, ce que j'ai fait en choisissant l'astronomie.

Au Pr. Alexei IVANOV (1957 - 2010) qui a guidé mes premiers pas en Science. Alex, a été l'encadrant de mon projet théorique lors de mon année passée à Cardiff (année scolaire 2005-2006). Travailler avec lui m'a permis de me familiariser avec une approche semi-classique de l'étude des *'régimes faibles et forts de couplages dans l'interaction matière-lumière'*. Il m'a également permis de confronter la vision que j'avais de la Science à la sienne et ainsi d'asseoir les bases de ma vision scientifique. Certes je n'étais qu'en troisième année de Licence, mais nos échanges étaient de scientifique à scientifique et non de professeur à étudiante. Il a toujours été au bout de ses raisonnements bien construits, démontrés, courts, concis et précis. En plus des connaissances scientifiques que j'ai acquises en travaillant avec lui, il paraîtrait qu'à mon retour de Cardiff j'ai aussi pris un peu de son accent russe dans mon anglais. Alex est et sera à jamais ma référence scientifique.

Au Pr. Hamid Ziani (1948-2004).

En remontant de l'atome à la molécule, de la molécule à l'amas nébuleux, de l'amas nébuleux à la nébuleuse, de la nébuleuse à l'étoile principale, de l'étoile principale au Soleil, du Soleil à la planète et de la planète au satellite, on a toute la série de transformations subies par les corps célestes depuis les premiers jours du monde. *Jules Verne* (1828-1905) [De la Terre à la Lune.]



REMERCIEMENTS

J'ai une pensée pour feu Pr. Alexei IVANOV et lui suis reconnaissante de m'avoir encadrée pendant près de dix mois (de Septembre 2005 à Juin 2006) sur un projet théorique. C'est durant cette période que j'ai fais mes premiers pas dans la Recherche Scientifique.

Je remercie Ana GOMEZ qui était chargée du Master 2 DSG (Dynamique des Systèmes Gravitationnels), qui m'a orientée dans ma formation et a toujours été à l'écoute.

Je remercie Jean SOUCHAY de m'avoir acceptée comme doctorante et accueillie au sein de son équipe au SYRTE. Je suis également reconnaissante à Anne LEMAÎTRE d'avoir bien voulu accepter de superviser une partie de mon travail et de m'avoir toujours accueillie chaleureusement durant mes séjours à Namur.

Je remercie les membres du Jury qui me font honneur par leur présence ; Bruno SICARDY qui préside le Jury, les deux rapporteurs Alberto CELLINO et Rudolf DVORAK ainsi que les examinateurs Jan VONDRAK et Mirel BIRLAN.

Un grand merci à Daniel GAMBIS qui a apporté un grand soutien matériel au cours de cette thèse. Je n'oublie pas le Directeur du SYRTE Noël DIMARCQ ainsi que notre gestionnaire Marine PAILLER qui, entre autres, auront débloqué des fonds pour payer la publication de mon premier article alors que je paniquais à 10.000 km de Paris faute de disposer du financement nécessaire.

Un grand merci également à Teddy CARLUCCI notre informaticien au SYRTE pour ses conseils et pour le temps passé à installer les programmes et outils informatiques dont j'avais besoin. Sans lui cette thèse n'aurait jamais pu ce faire je lui serai éternellement reconnaissante. Je remercie également deux autres informaticiens du SYRTE, Gilles SAKOUN et Pascal BLONÉ. Merci à Christophe LE PONCIN LAFITTE qui m'a permis d'utiliser sa machine pour mes intégrations numériques.

Je remercie Nicole CAPITAINÉ et Pierre TEYSSANDIER qui ont toujours répondu à mes questions. J'exprime également mes remerciements à l'égard de Gérard FRANCOU et Sébastien BOUQUILLON pour toutes les discussions et échanges que j'ai pu avoir avec eux, ainsi qu'à tout le reste du personnel du SYRTE en particulier à notre secrétaire Pascale BAUDOIN.

Cette thèse aura été l'occasion de rencontrer les membres de l'équipe d'Histoire, en particulier Michela MALPANGOTTO avec qui j'ai partagé le bureau durant les deux dernières années et qui m'aura fait découvrir ses travaux sur la période de la Renaissance. J'aurai également rencontré Michel BLAY et d'autres personnes lors des séminaires "Qu'appelle-t-on les débuts de la science

classique ?”, séminaires organisés par Michela et Michel BLAY (ENS/SYRTE).

Cette thèse au SYRTE aura été l’occasion de rencontrer des personnes remarquables telles que Suzanne DÉBARBAT et Danielle BRIOT, qui m’ont toutes deux permis de suivre des visites de l’Observatoire de Paris qu’elles guidaient.

Mes remerciements à toute l’équipe de Namur qui m’a toujours très bien accueillie, tout particulièrement à Benoît NOYELLES qui a bien voulu que je partage son bureau lors de mes divers séjours et pour toutes les discussions et les échanges que j’ai eu avec lui et aussi avec Christoph LHOTKA. Un grand merci à Charles HUBAUX, Emilie VERHEYLEWEGEN, Audrey COMPERE, Eric CORNELIS et tous les autres.

Merci à l’équipe de Vienne particulièrement mes collaborateurs Mattia GALIAZZO et Siegfried EGGL, sans oublier Akos BAZSO.

Je remercie Fumi YOSHIDA de l’Observatoire de Tokyo (NAOJ) pour l’accueil lors de mon séjour à Mitaka, et pour avoir partagé ses connaissances sur la détection des astéroïdes. Je lui suis aussi reconnaissante de m’avoir aidé à rejoindre l’Observatoire de Pirka à Nayoro sur l’île d’Hokkaido, d’où j’ai observé le transit de Vénus avec l’équipe de Thomas WIDEMANN (LESIA) et Paolo TANGA (Nice) que je remercie également.

Au travers de ma mission doctorale de médiation scientifique, j’ai pu au sein de l’équipe du Pr. Sylvie RETAILLEAU (IEF, Orsay et Doyenne de la faculté des Sciences de Paris Sud) faire mes premiers pas dans la médiation et la vulgarisation scientifique, avec l’aide de Hugues CAZIN (IEF) et Sylvain HELD (IEF). Je leur suis reconnaissante pour tout ce que j’ai pu apprendre avec eux.

Merci à mes collègues Syrtiens, des deux équipes Temps et Espace, notamment Frédéric MEYNADIER, Peter ROSEBUSCH, Sébastien LAMBERT, François TARIS, Christian BIZOUARD et Safwan ALJBAAE, ainsi que Yann BROUET (LERMA), Sandrine MARCHAL et toute l’équipe de la bibliothèque d’avoir consacré du temps à ma stagiaire pour lui parler de leurs activités.

Je remercie tous les responsables de l’École Doctorale d’Astronomie et Astrophysique d’Île de France (ED127) pour le temps consacré pour recevoir les doctorants et les félicite pour leur excellente organisation ; un grand merci à Jacqueline PLANCY, Agnès LEGUERER, Caroline TERQUEM et Patrick BOISSÉ.

Je n’oublie pas les professeurs qui m’auront marquée tout au long de mon parcours universitaire, notamment, Jacky CRESSON (Université de Pau) avec qui je travaille en ce moment et François LAUDENBACH (Université de Nantes) dont les cours de systèmes dynamiques m’ont à jamais marquée.

Enfin mes parents, mon frère Nadim, ma tante Huguette et mes cousins Marina, Djamilou et Karim ; ainsi que mes amis Yann SOVRAN, Vanessa BRAZIL, Rafael SFAIR, Nicole FEARON, Adria BRYAN pour m’avoir soutenue tout au long de cette thèse et même avant. Je remercie également tous mes amis Doc’Upiens, avec qui j’ai eu le plaisir d’organiser des manifestations pour les doctorants de l’UPMC ainsi que le festival de vulgarisation scientifique **Les chercheurs font leur cinéma** (éditions 2011 et 2012), en particulier Noémie NAGUET DE SAINT-VULFRAN pour les nombreuses heures passées à revoir l’ensemble de ce manuscrit.

Pour clore les remerciements, ces derniers sont adressés à une dernière personne mais pas des moindres, merci à C.L.



PRÉFACE

A l'aube du XXI^e siècle, l'intérêt pour l'étude des astéroïdes, pourtant inconnus il y a encore 210 ans de cela, est de plus en plus grandissant et ce pour de nombreuses raisons. Si certains voient dans ces corps des sources minières potentielles pour le futur, d'autres s'y intéressent pour prévenir les risques de collisions avec les planètes telluriques notamment avec la Terre.

Mon intérêt pour l'étude de ces objets est très '*terre-à-terre*'. En effet, je ne perçois pas ces objets comme potentielles sources de minéraux, ni comme des dangers pour la vie sur Terre mais plus comme les vestiges du système solaire primitif. La compréhension de la dynamique qui régit leurs mouvements, ainsi que l'étude de leurs distributions spatiales (orbitales), taxonomiques ou autres, est d'un intérêt fondamental pour comprendre la formation et l'évolution de notre système solaire.

Pourtant, contrairement aux autres objets primitifs tels que les comètes connues depuis l'Antiquité, leur découverte sera tardive. Il faudra attendre le début du XIX^e siècle.

Effectuant ma thèse au SYRTE (Systèmes de Référence Temps-Espace), laboratoire de l'Observatoire de Paris, il m'a paru indispensable de consacrer une partie de ce manuscrit à l'Histoire de la découverte de ces objets encore inconnus il y a 210 ans. Celle-ci est liée aux questionnements sur les systèmes de références, résultat de la révolution Copernicienne.

Dans un cheminement modeste de cette pensée, je me poserai la question que Laplace se posa dans le volume onze de ses Œuvres Complètes ; à savoir celle de l'existence d'un plan privilégié ayant un sens physique et auquel on se rapporterait pour l'étude des mouvements des corps du système solaire, plan qu'il appellera *invariable*.

En plus de la notion de système de référence qui est le mieux approprié à l'étude de ces objets, j'aborderai la question de la distribution orbitale des astéroïdes et des différentes populations issues des divers groupements observés. En effet, cette question de distribution des objets dans le système solaire est elle aussi liée à la découverte du premier petit corps, i.e Cérès au travers du questionnement sur les distances entre planètes. Ceci est d'un intérêt primordial pour la compréhension de l'histoire et de l'évolution de notre système solaire.

Je m'intéresserai également à un type de groupements particuliers, à savoir ceux liés à la notion de *familles d'astéroïdes* et principalement à la famille de l'astéroïde Vesta.

Nous ne pouvons aujourd'hui dissocier l'étude des propriétés physiques de celle des propriétés dynamiques. C'est pour cela qu'à la fin de mon manuscrit, je développerai également le sujet de détection des astéroïdes et essaierai de déterminer certaines de leurs propriétés physiques

telles que les magnitudes ou les périodes de rotation, à partir d'images réalisées au foyer du télescope SUBARU.

Je souhaite au travers de cette thèse poser les bases de réflexions qui seront développées et enrichies dans mes prochains travaux.

ABSTRACT

Key words: minor planets: asteroids– dynamical populations – Reference systems – methods: semi-analytical, statistical – methods: numerical – image analysis

Asteroids are regarded as the vestiges of our primitive solar system. Thus, the discovery of the first asteroid 210 years ago has profoundly changed our perception of the universe. In this thesis, I investigate both dynamical and observational aspects of the Main Belt asteroid populations.

The first chapter will be devoted to the discovery of the first Main Belt Asteroid and the consequences that followed. Furthermore, I will explain the importance for studying these populations as well as demonstrate the strong correlation between their discovery and the concept of the reference system.

The second chapter will introduce the nature of my problem, the dynamics of Main Belt Asteroids. In discussing my problem, I will focus on the most appropriate reference plane, the invariable reference plane, which was previously studied by Laplace over two centuries ago in his study of the dynamics of planets. In addition, I will discuss the study and characterisation of this plane, as well as the effect of the three largest minor-bodies of the solar system, and the contribution of the planets upon its orientation.

In the third chapter, I will focus on the study of Main Belt Asteroids which are regarded as natural laboratories, where one can test theories and dynamical models. The study will focus on examining the distributions of these populations in regards to orbital planes.

I will investigate another kind of distribution in the fourth chapter, as I am also interested in the study of dynamical families of asteroids, i.e. the remnants of a parent body after its break-up. In particular, I will study the long-term evolution of the members of the Vesta family. By use of a Gauss-Radau integrator, I will evaluate the diffusion of the Vesta family and compare the results to those obtained by use of symplectic integrators. The gravitational effects of all planets and the minor bodies (1) Ceres, (2) Pallas, and (4) Vesta, relativistic, as well as the non-gravitational Yarkowsky effects will be included in the dynamics.

Finally in fifth and sixth chapters, I will dive into the reduction and analysis of observational data of small asteroids. The data was acquired by the 8.2m SUBARU telescope, within the framework of the SMBAS-III (Sub-km Main Belt Asteroid Survey), with the sub-km asteroids

as primary targets. In Chapter five, I will present the infrastructure of the telescope as well as the two methods used for object detection: the classical, naked eye method and an automated one. Both these methods will be applied to the data, and the results will be presented in chapter six. Once the objects are detected, I will proceed to astrometric and photometric analysis, and where applicable, taxonomic classification as well as light curves and periods of rotation of the detected asteroids

In conclusion, I will demonstrate how this thesis has allowed me to explore different aspects of the Main Belt Asteroids.

RÉSUMÉ

Mots clefs : petits corps : astéroïdes – systèmes de références – populations dynamiques – méthodes : semi-analytiques, statistiques, numériques – traitement d’images

Les astéroïdes sont les vestiges de notre système solaire primitif. Inconnus il y a encore 210 ans de cela, leur découverte aura changé notre vision du monde. Je me suis proposée dans cette thèse d’étudier les aspects tant dynamiques qu’observationnels relatifs à ces objets.

Dans le premier chapitre, je prendrai le temps d’aborder le contexte historique de leur découverte ainsi que les conséquences qui feront suite à cette dernière. Je présenterai également quelques points essentiels quant à l’intérêt de leur étude. Je montrerai que leur découverte est très fortement liée à la notion de référentiel.

Ceci m’amènera dans le deuxième chapitre, à définir le plan de référence le mieux adapté à mon problème, à savoir à l’étude des astéroïdes. Laplace, il y a deux siècles de cela, s’était également intéressé à ce plan pour l’étude des planètes, introduisant ce qu’il appela *plan invariable*. Je consacrerai ainsi ce chapitre à l’étude et à la caractérisation de ce plan, mais aussi à l’évaluation de l’effet des “plus gros petits corps” du système solaire, et à la contribution de chaque planète sur son orientation.

Dans le troisième chapitre, je me cantonnerai à l’étude des astéroïdes de la ceinture principale. Je me pencherai sur les différentes distributions de ces populations, aujourd’hui considérées comme des laboratoires grandeur nature permettant de tester théories et modèles dynamiques. Je m’intéresserai en particulier à la distribution de ces populations en terme de plans orbitaux, et leur interprétation.

Dans le quatrième chapitre, je m’intéresserai à un autre type de distribution que sont les familles d’astéroïdes, i.e aux astéroïdes provenant d’un seul et même corps parent. En particulier, j’étudierai la dynamique à long terme des membres de la famille de l’astéroïde (4) Vesta. J’utiliserai un intégrateur de Gauss-Radau à pas variable en prenant en considération les effets gravitationnels de toutes les planètes et des trois petits-corps (1) Cérès, (2) Pallas et (4) Vesta. J’inclurai à cet égard les effets relativistes ainsi que l’effet Yarkowsky, par essence non gravitationnel. J’évaluerai la diffusion des membres de la famille ainsi que les rencontres proches et collisions éventuelles avec les petits corps perturbateurs.

Les cinquième et sixième chapitres seront consacrés aux observations des astéroïdes par un très

grand télescope, celui de 8,2m du SUBARU, dans le cadre du programme SMBAS-III (Sub-km Main Belt Asteroid Survey) qui a pour cible les astéroïdes sub-kilométriques de la ceinture principale. Dans le chapitre cinq, je présenterai toute l'infrastructure observationnelle de SUBARU ainsi que deux méthodes de détection des astéroïdes, l'une à l'œil nu, l'autre automatisée. Dans le chapitre six, j'appliquerai les deux méthodes sus-citées aux données SMBAS-III, permettant ensuite les études astrométriques, photométriques et dans certains cas de courbes de lumière des astéroïdes détectés, dont certains de taille sub-kilométrique.

En conclusion, je montrerai comment cette thèse m'a permis d'aborder sous différents aspects (systèmes de référence, dynamique, observations) la population des astéroïdes.

LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

AAA	Apollo-Amor-Aten
DE ephemerides	Development Ephemerides
DN	Digital Number
FOV	Field Of View
ICRF	International Celestial Reference Frame
ICRS	International Celestial Reference System
INPOP	Intégration Numérique Planétaire de l'Observatoire de Paris
LHB	Late Heavy Bombardment
MBA	Main Belt Asteroids
MMR	Mean Motion Resonance
NEA	Near Earth Asteroids
SMBAS	Sub-km Main-Belt Asteroids Survey
TNO	Trans-Neptunian Objets
UAI	Union Astronomique Internationale

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Aimez dévotement les maîtres
qui vous précédèrent.

Inclinez-vous devant Phidias
et devant Michel-Ange. Admirez
la divine sérénité de l'un, la
farouche angoisse de l'autre [...]

Gardez vous cependant d'imiter
vos aînés. Respectueux de la tradition,
sachez discerner ce qu'elle
renferme d'éternellement fécond :
l'amour de la Nature et la sincérité.

Ce sont les deux fortes passions des génies.

Auguste Rodin (1840-1917), l'art, entretiens réunis par Paul Gsell, 1911

1.1 Histoire

Depuis l'antiquité jusqu'au Moyen-Age, règnera une vision purement Ptolémaïque de notre univers, gouvernée par un géocentrisme Aristotélicien qui rendait difficile l'estimation des distances entre planètes ainsi que leurs positions (et leur ordre éventuel). Il faudra attendre la publication de *De revolutionibus* en 1543 par Nicolas Copernic (1473-1543) pour que soit décrite une vision héliocentrique du monde, qui ne sera pourtant établie que deux siècles plus tard.

Comme nous aurons l'occasion de le voir dans ce manuscrit, la question de l'espacement entre les planètes taraude depuis plusieurs siècles les esprits des philosophes, astronomes et mathématiciens ; ainsi, des lois diverses et variées seront proposées en ce sens.

Dans l'annexe [A](#), je montre l'évolution des questionnements liés à cette problématique au travers des âges. Dans ce chapitre, j'insiste sur la période qui a conduit à la découverte des pre-

miers astéroïdes, et discute les conséquences de ces découvertes tant sur l'évolution de notre compréhension du système solaire que sur l'évolution des lois donnant l'espacement entre les planètes.

J'aborde également la question des systèmes de référence, sur laquelle je reviendrai plus en détail dans la chapitre 2. Cette notion est centrale dans tout problème en physique, mathématique et astronomie.

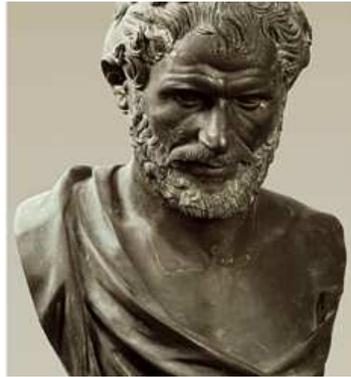


FIG. 1.1: Buste d'Aristote (env. 385-322 av. J.-C.). Bronze. Museo archeologico, Naples. Crédits : Aisa/ Leemage.

Il serait inconcevable d'aborder toutes ces questions sans consacrer quelques lignes à *la révolution Copernicienne*. En effet, cette révolution avec sa vision héliocentrique du monde venait succéder à plusieurs siècles de géocentrisme. La vision géocentrique Aristotélicienne prédominait avant Nicolas Copernic (1473-1543) (Fig. 1.2). Le géocentrisme a dominé l'astronomie occidentale de l'Antiquité à la Renaissance. Hérité de la Grèce Antique, il stipule que la Terre se trouve au centre du monde et qu'elle s'y tient immobile. L'Univers comporte : la Terre (au centre du monde), les deux luminaires (Lune et Soleil) et les cinq planètes connues à l'époque et toutes visibles à l'œil nu (Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne). Ces dernières sont toutes accrochées à une même sphère, et par conséquent sont toutes à la même distance du centre du monde [Verdet, 2012b].

Le géocentrisme des écoles grecques anciennes divise l'Univers en deux mondes :

- un monde sublunaire, monde terrestre, corrompu et continuellement altéré ;
- un monde supralunaire, le Cosmos, parfait, immuable et éternel. Il comporte les deux luminaires, les planètes ainsi que les étoiles. Des sphères concentriques (dont la Terre occupe le centre) portent les astres du Cosmos. Ces sphères sont appelées *orbes*.

Toutefois, cette théorie n'explique pas le mouvement rétrograde apparent des planètes dans le ciel.

Les plus grandes contributions à cette vision géocentrique du monde sont sans aucun doute celles de Platon (env. 428-347 av J.C.), d'Aristote (env. 385-322 av J.C.) (Fig. 1.1¹) ou encore celle de Claude Ptolémée (env. 90-168). Dans son *l'Almageste*², il met en valeur les résultats

¹©AISA /Leemage (www.leemage.com). Autorisation de publier dans ce manuscrit obtenu par email le 4 Octobre 2012.

²Nom sous lequel est connu le plus important traité de Ptolémée. Ce traité initialement écrit sous le nom de « Syntaxe mathématique » qui deviendra la « Grande Composition », puis *l'Almageste* après sa traduction en arabe [Costabel, 2012].

de ses prédécesseurs, en particulier ceux de l'astronome Hipparque de Nicée (env. 190-125 av J.C.) [Costabel, 2012] qui, suite à sa découverte de l'excentricité apparente des trajectoires du Soleil et de la Lune par rapport à la Terre, propose comme explication la composition de deux mouvements circulaires. Afin de concilier géocentrisme Aristotélicien et observations qui laissaient parfois apparaître un mouvement rétrograde des planètes, Ptolémée s'inspirera de l'idée d'Hipparque en proposant de combiner deux mouvements circulaires, connus sous le nom de la théorie des épicycles : les planètes évoluent sur un petit cercle (*l'épicycle*) dont le centre évolue le long d'un cercle plus grand (*le déférent*) qui correspond à *l'orbe* (cf. plus haut).

Cette théorie géocentrique sera continuellement améliorée au travers des siècles en particulier en rajoutant des épicycles afin de pouvoir expliquer les observations. Elle deviendra de plus en plus compliquée.

Pourtant, la vision géocentrique sera au Moyen-Âge l'armature de toutes les scolastiques chrétiennes et musulmanes [Aubenque, 2012].

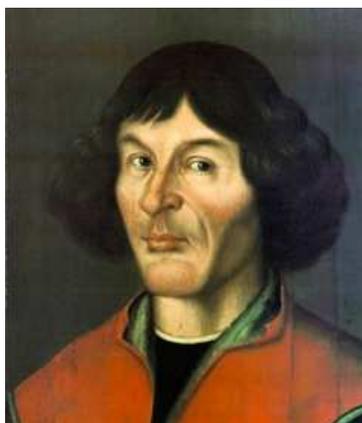


FIG. 1.2: Portait de Nicolas Copernic (1473-1543), exposé au musée de Toruń (Pologne) (image wikipédia).

Il faudra attendre 1543 pour que les travaux de Nicolas Copernic (1473-1543) (Fig. 1.2), qui posaient les fondements d'une vision héliocentrique, soient publiés³.

Ainsi, dans *De revolutionibus orbium coelestium* (Des révolutions des sphères célestes), Nicolas Copernic met en œuvre sa vision héliocentrique : c'est le Soleil qui est donc au centre de l'Univers et non plus la Terre. Ainsi, tous les mouvements apparents relevés sont dus aux combinaisons des mouvement de la planète Terre et des autres planètes.

Cette nouvelle philosophie du monde ne sera pourtant pas la bienvenue, et il faudra attendre un siècle pour qu'elle soit enfin adoptée. Elle conduira à de nouveaux questionnements quant à l'ordre des planètes ainsi que leurs distances mutuelles. Ces questionnements amèneront à supposer l'existence d'une planète entre Mars et Jupiter (Annexe. A).

Il faudra attendre la fin du XVIIIe siècle pour que ces spéculations et questionnements donnent naissance d'une part à la loi de Titius-Bode (Annexe. A), et d'autre part à la recherche de

³Le jour de sa mort, juste avant d'expirer, un exemplaire de l'édition de Nuremberg serait parvenu à Nicolas Copernic. Est-ce véridique ou juste une anecdote hagiographique ? [Verdet, 2012a]

la planète manquante entre Mars et Jupiter, planète qui s'avèrera être le premier petit corps découvert.

1.2 Découverte de Cérès : La chasse à la planète manquante

1.2.1 Zach et la chasse à la planète manquante

Suite à la découverte de la septième planète du système solaire Uranus, le 13 mars 1781 par William Herschel (1738-1822), la loi de Titius-Bode qui donne les distances mutuelles entre planètes gagnera en crédibilité. Lors d'une rencontre en 1783, entre ce dernier et Franz von Zach (1754-1832), ils discutèrent de la validité et de la justification de la loi de Bode (aussi connue sous le nom de : loi de Titius-Bode) ; ce qui mènera Zach (Fig. 1.3) à la chasse à la planète manquante [Cunningham, 2001].

Deux ans après la rencontre entre Herschel et Zach, ce dernier prédit les éléments orbitaux de la planète supposée. Il donnera une distance au soleil de 2,82 AU, une excentricité de 0,14, une inclinaison de $1^{\circ}36'$ et une longitude du périhélie de $192^{\circ}6'$. Cette planète aurait donc une période orbitale de 4.74 années [Cunningham, 2001]. Il enverra ces résultats sous enveloppes scellées à Johannes Bode [von Zach, 1801], au Duc de Gotha (1745-1804), à Hans Count von Bruhl et à Johann Kohler (1745-1801). Ces résultats seront publiés en 1789, dans *Astronomical Yearbook* (1789), p. 182, 183 [von Zach, 1801], [Cunningham, 2001].

En 1799, Zach et les cinq astronomes J.H. Schroeter (1745-1816), K.L. Harding (1765-1834), Wilhelm Olbers (1758-1840), Ferdinand Adolf von Ende (1760-1816), Johann Gildemeister (1753-1837) décident de coordonner leurs efforts. Zach forme une coopération ou association (Zach utilisera le terme anglais de *society*) le 21 septembre 1800 à Lilienthal. Il en sera d'ailleurs élu secrétaire permanent et Schroeter en sera le président. Cette association, ou société astronomique, aura pour but d'organiser une campagne d'observations. Un appel sera lancé à la recherche de 24 astronomes à travers l'Europe ; le but étant de diviser tout le zodiaque en 24 zones.

Les 24 astronomes sont : Johann Elbert Bode (1747-1826) à Berlin, Joseph Buerg⁴(1766-1834) à Vienne, Thomas Bugge (1740-1815) à Copenhague, Johann Karl Burckhardt (1773-1825) à Paris, William Herschel (1738-1822) à Slough, Johann Sigismund Gottfried Huth (1763-1818) à Francfort, Georg Simon Klügel (1739-1812) à Halle, J.A. Koch à Danzig, Nevil Maskelyne (1732-1811) à Greenwich, Daniel Melanderhjelm (1726-1810) à Stockholm, Pierre Mechain (1744-1804) à Paris, Charles Messier (1730-1818) à Paris, Barnaba Oriani (1753-1832) à Milan, Giuseppe Piazzi (1746-1826) à Palerme, Friedrich Theodor von Schubert (1758-1825) à St. Petersbourg, Jan Sniadecki (1756-1830) à Cracovie, Jacques-Joseph Thulius (1768-1810) à Marseille, Johann Friedrich Wurm (1760-1833) à Blaubeuren, Ferdinand Adolph Freiherr von Ende (1760-1816) à Celle, Johann Gildemeister (1753-1837) à Brême, Karl Ludwig Harding

⁴Buerg ou Bürg, Johann Tobias (1766-1834) astronome allemand [Thomas, 2005]. Membre très actif des "Ephémérides" de Vienne, il remporte, en 1798, un prix offert par l'Institut de France au détriment de son collègue français, Alexis Bouvard (1767-1843). Il participera à l'élaboration des "Ephemerides astronomicae anni 1794 (-1806)..." et des "Tables astronomiques publiées par le Bureau des Longitudes de France..." (1806) (<http://www.idref.fr/070723923>).

(1765-1834) à Lilienthal, Jons Svanberg (1771-1851) à Upsal, Heinrich Wilhelm Matthäus Olbers (1758-1840) à Brême, Johann Schroeter (1745-1816) à Lilienthal, Franz von Zach (1754-1832) à Gotha.

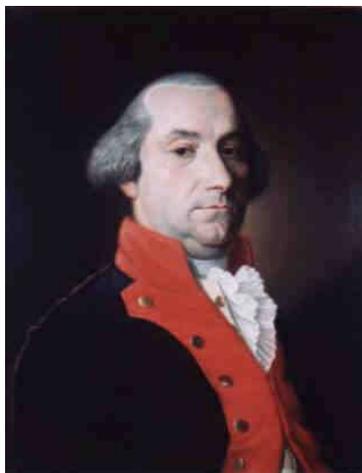


FIG. 1.3: Baron Franz Xaver von Zach (1754-1832).

Chaque observateur était chargé de scruter une zone particulière du ciel qui s'étendait sur 15° en longitude, et de $+7^\circ$ à -8° en latitudes écliptiques.

La découverte (observation) de la planète manquante par Giuseppe Piazzi (1746-1826) (Fig. 1.4), le 1^{er} janvier 1801, confirmera la validité de la loi de Titius-Bode. En juin 1801, six mois après la découverte de la-dite planète Cérès, l'astronome allemand Franz Xaver von Zach (1754-1832) revoit la loi de Titius-Bode (qu'il appelle loi de Bode) ; le nationalisme qui règne en Europe au début du XIXe siècle est plus que présent dans sa publication [von Zach, 1801]. Il fera remarquer que seuls les allemands se seraient réellement posés la question de l'existence d'une planète entre Mars et Jupiter, et auraient osé l'écrire.

Prof. Bode had made first confession of this remarkable relationship in 1772, in the 2nd edition of his "Introduction to the Knowledge of the Bespeckled Heavens" [von Zach, 1801].



FIG. 1.4: Giuseppe Piazzi (1746-1826) (source : wikipédia)

1.2.2 Piazzini et la planète Cérès-Ferdinandea

La nuit du 31 décembre 1800 à Palerme, à l'aide d'un cercle vertical de 1.5m de diamètre (Fig. 1.5), Piazzini travaillait à la mise à jour du catalogue d'étoiles de Francis Wollaston (1731-1815). Il observa à 8:43 (heure locale) dans la constellation du Taureau, ce qu'il pensait être une étoile (non présente dans le catalogue), objet de magnitude 8. Il remarquera dans les heures qui suivirent et aussi le lendemain que "la-dite étoile" s'était déplacée de 4' vers l'ouest et légèrement vers le nord. Il en informera aussitôt Joseph Jérôme Lefrançois de Lalande (1732-1807). Le 24 janvier, il envoya un courrier à Barnaba Oriani (1752-1832) qui se trouvait à ce moment-là à l'Observatoire de Milan. Etant données les circonstances de l'époque (invasion de l'Italie par l'armée de Napoléon 1^{er}), cette lettre sera écrite en dialecte Sicilien. Piazzini y mentionnera un objet qui n'est ni une étoile, ni une comète et suggèrera la découverte de la planète manquante. Plus tard, il enverra à Bode un courrier similaire ou presque, dans lequel il parlera uniquement de comète. La découverte de la planète manquante sera officiellement



FIG. 1.5: Cercle de Ramsdem utilisé par Piazzini pour la mise à jour du catalogue d'étoiles, le jour où il découvrit Cérès. Sur ce schéma, deux des quatre arches ne sont pas représentées pour des raisons de clarté [Hoskin, 1995] (image libre de droit).

annoncée l'été 1801. S'en suivra une annonce de trois lignes dans le Times de Londres du 7 août 1801 [Cunningham, 2001] :

'An important discovery has been announced - that of a new planet. M. Piazzini, an Italian astronomer, claims the merit of this discovery.'



Title page of Giuseppe Piazzi's book "On the discovery of the new planet CERES FERDINANDEA, the eight of those known in our solar system". The vignette, against the background of Monte Pelegrini and the city of Palermo, shows an angel observing the goddess Ceres sitting in a carriage drawn by two snakes. The inscription on the telescope "CERES ADDITA COELI" (Ceres was added to the heavens) celebrates this epoch-making discovery of the first of the minor planets. (Courtesy of A. Baldi, Bologna)

FIG. 1.6: Page de garde du livre de Giuseppe Piazzi (1746-1826) sur la découverte de Cérès [Schmadel, 2003]. Sur la lunette, on lit l'inscription suivante 'CERES ADDITA COELI', ce qui signifie 'Cérès rejoint les cieux.' (image libre de droit).

Piazzi nomma la planète *Ceres Ferdinandea*, en hommage à Cérès, déesse de l'agriculture, des moissons et de la fécondité, et à Ferdinand I (1751-1825), roi de Naples et de Sicile.

Ce nom créa une grande controverse en Europe, qui se rajouta au fait que Piazzi avait caché la découverte de la planète pendant les premières semaines. En Allemagne, le nom choisi était Juno (Juno en Français) ; cependant Zach prétendra que le Duc de Gotha Ernest II lui avait demandé 16 ans auparavant de nommer la planète entre Mars et Jupiter *Hera* (nom de la déesse Juno, en grec). En France, Napoléon Bonaparte s'en mêla lui aussi et utilisera le nom de Junon [Cunningham et al., 2009], [Cunningham, 2001].

1.3 Astéroïde ou planète

Les questions soulevées par la controverse qui a fait (et fait toujours) suite à la "dégradation" de Pluton au rang de planète naine, ou même la promotion de l'astéroïde (1) Cérès à ce même rang remontent à bien plus tôt que le XXI^{ème} siècle.

En effet, après la découverte de Cérès (Sect. 1.2.2), le 28 mars 1802 Heinrich Wilhelm Matthäus Olbers découvre 'une deuxième planète' entre Mars et Jupiter : Pallas. Ces petits corps découverts entre Mars et Jupiter étaient trop petits pour être qualifiés de planètes, en apparaissant comme des étoiles. Le terme générique d'*astéroïde* (qui, en grec, signifie 'comme une étoile') sera proposé par William Herschel [Cunningham, 2004], [Cunningham et al., 2009]. Il faudra attendre les années 1820 pour que ce terme soit adopté par la communauté astronomique.

Depuis 2006 une nouvelle nomenclature a été adoptée à Prague lors de la XXVI^{ème} Assemblée Générale de l'UAI (Union Astronomique Internationale). Les conventions suivantes (issues de la résolution 5) en sont ressorties.

Les planètes et autres corps du système solaire sont répartis en trois catégories [IAU, 2006] :

1. Une planète est un corps céleste qui :
 - a) est en orbite autour du Soleil,
 - b) a une masse suffisante pour que sa gravité l'emporte sur les forces de cohésion du corps solide et le maintienne en équilibre hydrostatique, sous une forme presque sphérique,
 - c) a éliminé tout corps susceptible de se déplacer sur une orbite proche.
2. Une "planète naine" est un corps céleste qui :
 - a) est en orbite autour du Soleil,
 - b) a une masse suffisante pour que sa gravité l'emporte sur les forces de cohésion du corps solide et le maintienne en équilibre hydrostatique, sous une forme presque sphérique,
 - c) n'a pas éliminé tout corps susceptible de se déplacer sur une orbite proche,
 - d) n'est pas un satellite.
3. Tous les autres objets en orbite autour du Soleil sont appelés "petits corps du Système Solaire".

Même si la frontière entre planète naine et astéroïde peut parfois paraître ambiguë, elle devient plus claire lorsque des propriétés physiques du corps sont prises en considération. Ainsi, contrairement aux astéroïdes, les planètes naines ont une macroporosité nulle.

Dans ma thèse, je me suis intéressée aux petits corps du système solaire, aux *astéroïdes de la ceinture principale* plus exactement. Cette population est située entre 2,1 et 3,5 au.

Dans les prochains paragraphes, je m’attarderai sur le modèle de formation du système solaire et sur l’intérêt de l’étude des *petits corps du système solaire*, en particulier des astéroïdes, pour clore ce chapitre avec un état des lieux de la ceinture principale d’astéroïdes.

1.4 Formation du système solaire

L’hypothèse selon laquelle une nébuleuse protoplanétaire serait à l’origine du système solaire remonte à 1755. Cette hypothèse émise par Emmanuel Kant (1724-1804) sera reprise en 1796 par Pierre-Simon De Laplace (1749-1827). Il faudra attendre 1943 et les travaux du physicien allemand Carl von Weizsäcker (1912-2007) pour que cette hypothèse soit clairement posée et qu’elle trouve les fondements que nous lui connaissons. Aujourd’hui encore elle est l’hypothèse la plus probable pour expliquer la formation de notre système solaire vieux de 4,6 milliards d’années.

L’étude de la formation du Système Solaire est donc pluri-disciplinaire, nécessitant des interactions entre astrophysique, astronomie (mécanique céleste), géologie, etc ... afin de contraindre au mieux le système primitif. Le modèle le plus communément adopté aujourd’hui pour expliquer la configuration actuelle du système solaire (planètes, astéroïdes, comètes, météorites ...), après sa formation et après dissipation du gaz de la nébuleuse circum-solaire est connu sous le nom du “*modèle de Nice*”⁵ [Tsiganis et al., 2005] qui explique la configuration actuelle des planètes (demi-grands axes, excentricités et inclinaisons).

En effet, à partir de la configuration initiale suivante du modèle de Nice [Tsiganis et al., 2005], [Gomes et al., 2005] : les orbites circulaires et coplanaires, les excentricités de Jupiter, Saturne et Uranus atteignant respectivement des valeurs maximales de 0,06, 0,09 et 0,08, et les inclinaisons de Saturne, Uranus et Neptune qui auraient pour limite supérieure une valeur de 2° par rapport au plan moyen de Jupiter.

Selon ce modèle, la configuration actuelle des planètes s’explique par une migration planétaire, conséquence d’une résonance de moyen mouvement excentrique (MMR) 1 : 2 entre Jupiter et Saturne, 700 millions d’années après leur formation. Les planètes géantes, avec des demi-grands axes compris dans l’intervalle 5.45 au et 15 au [Gomes et al., 2005], finiront par migrer vers l’intérieur pour Jupiter et vers l’extérieur pour Saturne, Uranus et Neptune.

Dans le cadre de ce même modèle [Gomes et al., 2005], les auteurs suggèrent une explication partielle du bombardement massif tardif⁶ (LHB - Late Heavy Bombardment). Le modèle de Nice [Tsiganis et al., 2005], [Gomes et al., 2005] suggère que le LHB a été causé par la migration rapide des planètes. Cette migration abrupte provoquera la déstabilisation du disque de planétésimaux qui seront alors propulsés vers le système solaire interne, provoquant des impacts avec les planètes telluriques et la Lune.

Ce modèle [Tsiganis et al., 2005], [Gomes et al., 2005], [Morbidelli et al., 2005] explique donc aujourd’hui la distribution actuelle des planètes, une partie du LHB ainsi que la distribution de certaines populations de petits corps, notamment les populations chaudes (de hautes

⁵Le groupe à l’origine de ce modèle travaillant à l’Observatoire Nice.

⁶Dans tous ce qui suit, j’utiliserai la notation LHB en parlant du bombardement massif tardif.

inclinaisons) de la ceinture principale d'astéroïdes, les troyens de Jupiter et les populations trans-neptuniennes.

La contrainte des 700 millions d'années après la formation des planètes pour le début de la migration [Tsiganis et al., 2005], [Gomes et al., 2005] provient d'études pétrologiques lunaires [Hartmann et al., 2000], qui suggéraient un pic de bombardement cataclysmique 700 millions d'années après la formation des planètes, soit il y a environ 3,7 milliards d'années. En effet, on datait la fin du LHB à la formation du Bassin Orientale lunaire. Cependant, une étude récente [Bottke et al., 2012], laisse penser que cet épisode cataclysmique de l'histoire de notre système solaire aurait duré beaucoup plus longtemps, jusqu'à il y a 1,7 milliards d'années.

1.5 Pourquoi s'intéresser aux astéroïdes

Notre système solaire vieux de plus de 4,6 milliards d'années a beaucoup évolué depuis la formation de la nébuleuse protoplanétaire. Les astéroïdes et comètes sont les vestiges les plus anciens qui nous permettent de contraindre les modèles et de comprendre jusqu'à la naissance du système solaire.

Les planètes ont en effet connu d'importants changements, notamment à leur surface, conséquence des érosions dues à l'activité de leur tectonique, au volcanisme, à l'activité du noyau, mais surtout des changements surfaciques dus aux impacts (LHB), ce qui ne laisse aucune trace de l'état primitif.

Certes, le système solaire a beaucoup évolué depuis ses débuts, notamment par le processus des migrations planétaires [Tsiganis et al., 2005], [Gomes et al., 2005] qui ont induit des inversions entre résonances, ce qui aurait donné lieu à la distribution actuelle des corps dans le système solaire. Ainsi, la distribution des astéroïdes aujourd'hui ne reflète nullement la distribution d'origine.

Les astéroïdes étant pour la majorité petits, avec des diamètres inférieurs à 400 km, ils n'auront pas connu d'activité radiogénique importante, ce qui empêchera la fonte et la constitution d'un noyau et ce qui explique la macroporosité de ces objets. Leur évolution est donc principalement exogène et reflète les conditions du milieu dans lequel ils ont évolué.

Dans ma thèse, je me suis intéressée à la population d'astéroïdes de la ceinture principale telle qu'elle est aujourd'hui. Je m'intéresse à la distribution spatiale et dynamique de cette dernière et me pose la question de définir le système de référence le mieux adapté à mon étude [Souami and Souchay, 2012]. Je m'intéresse également à l'évolution de certains groupements, notamment les familles d'astéroïdes et en particulier celle de l'astéroïde (4) Vesta [Galiazzo et al., 2011], [Galiazzo et al., 2012], [Souami et al., 2012b].

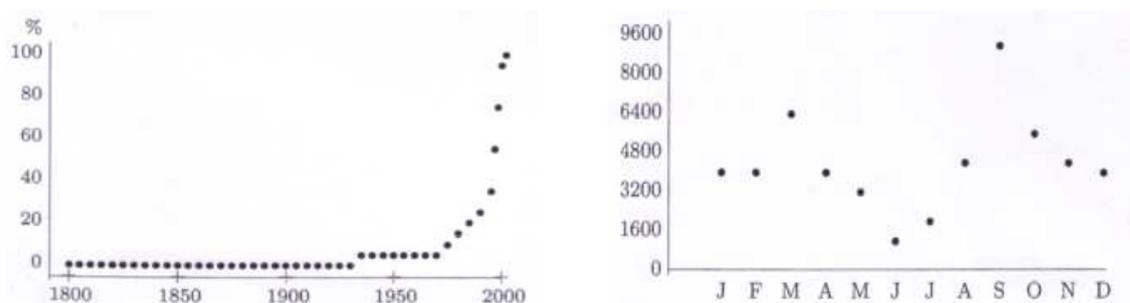
Je me suis penchée aussi sur la détection d'astéroïdes dans le cadre du survey SMBAS (Sub-Km Main Belt Asteroids Survey) [Yoshida et al., 2001], [Yoshida et al., 2003], [Yoshida and Nakamura, 2004], [Yoshida and Nakamura, 2007] [Dermawan et al., 2011], [Souami et al., 2012d], dans le but de détecter des astéroïdes, d'établir leurs éléments orbitaux ainsi qu'une classification taxonomique, d'extraire les courbes de lumières et par conséquent d'en déduire les périodes de rotation.

Toutes ces propriétés physiques intrinsèques sont nécessaires à la compréhension de la dynamique de ces objets, ce que je m’efforcerai de démontrer tout au long des prochains chapitres.

1.6 Contexte actuel

Un long chemin a été parcouru depuis la découverte de Cérès par Piazzi le 1^{er} janvier 1801 (Sect. 1.2). Deux cents ans jour pour jour après, l’astéroïde (234302) 2001AA Mars-croiseur est découvert par NEAT (Near-Earth Asteroid Tracking)⁷.

On compte aujourd’hui 524.541 petits corps dans tout le système solaire⁸. En comparaison rappelons que le cap des 1.000 petits corps a été atteint en 1921, et on en dénombrait 2.000 peu de temps après la seconde guerre mondiale [Schmadel, 2003].



(a) Progression dans la découverte des petits corps (1801-2002) [Schmadel, 2003].

(b) Variations annuelles du nombre de petits corps découverts par le MPC (pour l’année 2002) [Schmadel, 2003].

FIG. 1.7: Statistiques sur la découverte des petits corps.

La figure 1.7(a) montre la progression des découvertes de 1801 à 2002. On note une importante augmentation depuis une trentaine d’années. Ceci est dû à l’amélioration des techniques d’observation et à l’avènement des “surveys” dédiés à la recherche surtout d’astéroïdes géo-croiseurs. On verra également (Fig. 1.7(b)) la progression des découvertes effectuées au MPC (Minor Planet Center) sur l’année 2002. Deux pics sont visibles : un au printemps, l’autre en automne, avec une différence non négligeable entre les deux. Ceci est dû au fait que la plupart des observations se font depuis l’hémisphère nord où les conditions d’observations loin de la bande de la voie lactée favorisent la détection des objets. Les cinq observatoires avec le plus grand nombre de découvertes en 2002 sont les suivants, d’après [Schmadel, 2003] : l’Observatoire de Socorro (avec 20.243 astéroïdes) ; Palomar (4.796), La Silla (3.721) ; Anderson Mesa (2.517) et l’Observatoire Kitt Peak (2.111).

⁷<http://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/NumberedMPs230001.html>

⁸<http://hamilton.dm.unipi.it/astdys/index.php?pc=0> : accès le mardi 14 août 2012.

Première partie

Etude dynamique des populations d'astéroïdes

CHAPITRE 2

SYSTÈME DE RÉFÉRENCE : LE PLAN INVARIABLE

Comme j'ai pu le montrer au début du chapitre précédent, la notion de référentiel aura été d'un grand intérêt dans l'histoire de la découverte des astéroïdes.

Ayant passé ces trois années de thèse au sein du SYRTE (Systèmes de Référence Temps-Espace), je ne pouvais pas aborder les notions de systèmes de références et de repères. Ces notions sont centrales, dans tous les domaines de l'astronomie, de la physique ...

Elles renferment une notion tout aussi importante ; celle de l'*invariance*, que l'on retrouve en mécanique classique, en physique des particules, en mathématiques, de la théorie des groupes aux théories des systèmes gravitationnels, en passant par la topologie et la géométrie ...

2.1 Le Système International de Référence Céleste (ICRS)

C'est sur ce même principe d'invariance que l'UAI, lors de sa XXIII^e assemblée générale en 1997 à Kyoto, adopta la résolution B2 [IAU, 1997] qui a donné naissance au Système Céleste International de Référence (ICRS) et au repère qui y est associé, à savoir l'ICRF [Ma et al., 1998], puis l'ICRF2 [IAU, 2009], [Ma et al., 2009].

Les critères pour la construction d'un tel référentiel avaient été définis lors de la XXI^e Assemblée générale de l'UAI à Buenos Aires en 1991 (résolution A4) [IAU, 1991]. Pour n'en citer que quelques uns [Chenal, 2011], [IAU, 2009] :

- le cadre théorique est celui de la Relativité Générale.
- l'origine de l'ICRS est le barycentre du système solaire.
- le pôle de l'ICRS est défini à partir des conventions pour la précession et la nutation de la Terre.
- l'échelle de temps est celle du temps-coordonnées barycentrique (TCB).
- l'origine des ascensions droites est définie en fixant l'ascension droite du quasar 3C273B à sa valeur dans le catalogue FK5, à l'époque J2000.0 et en établissant la moyenne des ascensions droites de 23 radio-sources extragalactiques figurant dans les catalogues VLBI.

Le but de la construction d'un tel système est de construire un repère inertiel ou d'essayer de s'en rapprocher. L'ICRF [Ma et al., 1998], [Ma et al., 2009] est donc le premier repère à s'affranchir des termes associés à la rotation de la Terre. Il est donc sans rotation globale.

Pour en venir au point suivant, j'aimerais citer la recommandation II de la résolution A4 [IAU, 1991] adoptée par la 21^{ème} assemblée générale de l'UAI à Buenos Aires Argentine, en 1991.

« Cette recommandation reconnaît que l'espace-temps ne peut pas être décrit par un système de coordonnées unique parce qu'un choix judicieux d'un système de coordonnées peut faciliter de façon significative la résolution des problèmes et clarifier la signification physique des phénomènes qui s'y rapportent... »

Se pose alors la question du repère approprié à l'étude des objets du système solaire, ou dans mon cas particulier de la dynamique des astéroïdes de la ceinture principale qui a toujours ou presque (voir explication ultérieure) été rapportée à l'écliptique¹, celui-ci étant bien défini par rapport à l'ICRS.

En gardant à l'esprit le principe d'*invariance*, ainsi que mon intérêt physique pour le problème qui est l'étude de la dynamique globale de la population de la ceinture principale, il m'a paru judicieux de me rapporter au *plan invariable* [Souami and Souchay, 2012]. Ce dernier aurait été introduit pour la première fois par Pierre Simon De Laplace. Dans le volume 11 de ses Œuvres complètes, il écrira :

'La considération de ce plan est d'autant plus importante que, vu les mouvements particuliers des étoiles et la mobilité des orbites des planètes, il deviendra dans la suite des siècles, très utile d'avoir un plan invariable auquel on puisse, à toutes les époques, rapporter les mouvements des corps célestes. Celui que nous venons de considérer a l'avantage d'être fixe, du moins lorsque l'on fait abstraction des corps étrangers au système planétaire, action qui, jusqu'à présent, est insensible.' [De Laplace, 1878, pg. 551]

2.2 Définition du plan invariable

En faisant abstraction des corps étrangers au système planétaire, comme stipulé par Laplace, c'est-à-dire en considérant le système solaire comme étant isolé, son moment angulaire total est constant par rapport à un référentiel inertiel.

Ainsi, le *plan invariable* est défini comme étant le plan perpendiculaire au vecteur moment angulaire total du système et passant par le barycentre de ce dernier. Tremaine et ses collaborateurs [Tremaine et al., 2009] feront remarquer à juste raison, que plusieurs personnes tendent à confondre *plan invariable* et *plan de Laplace*². Cela aura engendré mon errance durant plusieurs jours.

¹De nos jours, l'écliptique moyen à l'époque J2000.0 est considéré. Il est défini comme étant le plan perpendiculaire au moment cinétique moyen du Barycentre Terre-Lune à l'époque.

²Soit le système suivant : planète, son satellite et le Soleil. Considérons l'orbite du satellite, ici le corps central est la planète et le corps perturbateur le soleil. L'aplatissement de la planète engendrera la précession du plan orbital du satellite autour du pôle de cette dernière. La perturbation du Soleil induira elle aussi une précession supplémentaire du plan orbital du satellite autour du pôle de l'orbite de révolution autour du Soleil. Le plan de Laplace (plus précisément, surface de Laplace ; celle-ci n'étant pas un plan au sens Euclidien du terme) est le plan de référence dont le pôle prend en considération ces deux effets cumulés. Il se situe entre le plan équatorial de la planète et son plan orbital.

Pour un système solaire isolé, le *plan invariable* (**IP**) présente donc l'avantage d'être *fixe* par rapport aux coordonnées temporelles et spatiales ; ce qui n'est pas le cas de l'écliptique.

2.2.1 Plan invariable ou invariant

Bien qu'ayant parlé d'invariance depuis le début du chapitre, j'utilise le terme *invariable* et non *invariant* pour qualifier le plan. Ce choix n'est pas anodin ; bien qu'étant convaincue du choix de mon vocabulaire, j'étais consciente de mon incapacité à expliquer la différence à certaines personnes. Après une discussion avec le mathématicien *Jacky CRESSON* et un ami physicien, je suis arrivée à ce qui suit :

Certes, la notion d'*invariance* à laquelle est associée la notion d'objet *invariant* est je l'admets un peu abstraite ; cependant les fondements mathématiques qui la régissent sont clairs. Elle ne peut être dissociée d'une action mathématique et elle a beaucoup évolué. Lorsqu'on parle d'invariant, la question qui doit être posée est *Par quelle action ? Quelle est l'action qui laisse cet objet invariant ?* Je développe :

Soit f une application d'un ensemble E dans lui-même. Soit X un sous ensemble de E . Si $f(X)$ est dans X , on dit que la partie X de E est invariante par f . On pourra en mécanique par exemple parler d'invariance par un groupe de rotations ou par translations.

Nous pourrions parler d'invariance du plan défini en Sect. 2.2 par rapport à certains groupes de translations ou de rotations, mais tant que nous n'avons pas défini l'action qui le laisse invariant, il ne peut être invariant. Il est par conséquent invariable, car associé à la conservation de certaines quantités physiques.

2.3 Détermination du plan invariable

2.3.1 Dans le cadre de la mécanique classique

En mécanique Newtonienne, on écrira le vecteur moment angulaire total d'un système à N -corps dont on négligera les rotations comme suit :

$$\mathbf{L}_{\text{tot}} = \sum_{j=1}^N m_j \mathbf{r}_j \times \dot{\mathbf{r}}_j, \quad (2.1)$$

m_j , \mathbf{r}_j et $\dot{\mathbf{r}}_j$ sont respectivement, la masse, le vecteur position barycentrique et le vecteur vitesse barycentrique du $j^{\text{ème}}$ corps.

La norme du vecteur moment angulaire total est donné par :

$$L_{\text{tot}} = \sqrt{L_1^2 + L_2^2 + L_3^2}, \quad (2.2)$$

L_1, L_2, L_3 , sont les composantes catésiennes du moment angulaire total \mathbf{L}_{tot} (Eq. 2.1).

Elles sont données par :

$$\begin{aligned} L_1 &= \sum_{j=1}^N m_j (y_j \dot{z}_j - z_j \dot{y}_j), \\ L_2 &= \sum_{j=1}^N m_j (z_j \dot{x}_j - x_j \dot{z}_j), \\ L_3 &= \sum_{j=1}^N m_j (x_j \dot{y}_j - y_j \dot{x}_j), \end{aligned} \quad (2.3)$$

x_j, y_j, z_j (respectivement, $\dot{x}_j, \dot{y}_j, \dot{z}_j$) sont les composantes cartésiennes du vecteur position (respectivement, vitesse) du $j^{\text{ème}}$ corps.

Les composantes du vecteur moment angulaire (Eq. 2.3) sont également données par :

$$\begin{aligned} L_1 &= L_{tot} \cdot \sin \Omega \cdot \sin i, \\ L_2 &= -L_{tot} \cdot \cos \Omega \cdot \sin i, \\ L_3 &= L_{tot} \cdot \cos i, \end{aligned} \quad (2.4)$$

Ω et i sont respectivement la longitude du noeud ascendant et l'inclinaison du plan invariable par rapport à un référentiel inertiel quelconque. Ici, je considérerai le cas de la détermination de ces paramètres et par conséquent du plan invariable par rapport à l'écliptique-équinoxe de l'époque J2000.0 et par rapport à l'ICRF (origine et équateur) [Ma et al., 2009].

Les équations 2.1 à 2.4 donnent pour l'inclinaison :

$$i = \arccos \frac{L_3}{L_{tot}}, \quad (2.5)$$

et pour la longitude du noeud ascendant³ :

$$\Omega = \arctan \frac{-L_1}{L_2}, \quad (2.6)$$

2.3.2 Dans le cadre relativiste

Les effets relativistes jusqu'au premier ordre de l'effet post-newtonien étant pris en considération dans la compilation des éphémérides numériques que j'utiliserai (DE405/DE406 [Standish, 1998] et INPOP10a [Fienga et al., 2010], [Kuchynka, 2010]), je me dois de les introduire dans le calcul du moment total du système.

L'équation (2.1) s'écrira donc :

$$\mathbf{L}_{tot} = \sum_{j=1}^N m_j^* \mathbf{r}_j \times \dot{\mathbf{r}}_j, \quad (2.7)$$

³parfois, j'utiliserai par souci de simplification de l'écriture 'noeud' au lieu de 'longitude du noeud ascendant'.

De même le système d'équations 2.3 s'écrira :

$$\begin{aligned} L_1 &= \sum_{j=1}^N m_j^* (y_j \dot{z}_j - z_j \dot{y}_j), \\ L_2 &= \sum_{j=1}^N m_j^* (z_j \dot{x}_j - x_j \dot{z}_j), \\ L_3 &= \sum_{j=1}^N m_j^* (x_j \dot{y}_j - y_j \dot{x}_j), \end{aligned} \quad (2.8)$$

en remplaçant la masse m_j du $j^{\text{ème}}$ corps par la masse effective correspondante m_j^* (connue sous le nom de *Tolmann-Mass*). Cette dernière est donnée par :

$$m_j^* = m_j \cdot \left[1 + \frac{\dot{\mathbf{r}}_j^2}{2c^2} - \frac{1}{2c^2} \left(\sum_{k \neq j} \frac{Gm_k}{|\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_j|} \right) \right], \quad (2.9)$$

$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$ étant la vitesse de la lumière dans le vide [Luzum et al., 2011] et G désignant la constante universelle de la gravitation .

2.3.3 Méthode

Afin de déterminer l'orientation du plan invariable, j'ai utilisé les éphémérides numériques à long terme suivantes :

- *Development Ephemerides* DE 405/406 [Standish, 1998]. Ce ne sont pas les éphémérides les plus récentes fournies par le JPL (Jet Propulsion Laboratory) mais ce sont celles qui couvrent l'intervalle de temps le plus long (environ 6000 ans pour DE406⁴, voir Tableau 2.1). Pour DE405, les positions des planètes internes sont données avec une précision de 0'.001. En ce qui concerne la compilation des positions des planètes externes, elles sont essentiellement basées sur des observations optiques. La position de Jupiter par exemple est donnée avec une barre d'erreur de 0'.01.

- *Intégration Numérique Planétaire de l'Observatoire de Paris* INPOP10a [Fienga et al., 2010], [Kuchynka, 2010], fournies par l'IMCCE (Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides). Ces éphémérides exploitent les données observationnelles les plus récentes et donc de meilleures contraintes : les données des missions MEX et VEX pour Mars et Vénus ; de la mission Cassini pour Saturne ainsi que les résultats de plusieurs survols de Jupiter, Uranus, et Neptune (Pionner 10 et 11, Viking 1 et 2, Ulysses et Cassini) ; mais aussi d'occultations stellaires dans le cas de (134340) Pluton. Les éphémérides INPOP10a sont ajustées sur l'intervalle [1914.2 : 2009.7], elles sont ensuite extrapolées sur un intervalle de temps plus long (Table 2.1).

Les perturbations des 300 astéroïdes les plus massifs ont été prises en considération dans la compilation des deux éphémérides de la manière suivante :

⁴Pour la compilation de DE406, l'ordre des polynômes de Chebychev considérés est moins élevé que ceux qui interviennent dans la compilation de DE405 [Standish, 1998].

TAB. 2.1: Intervalle de temps couvert par chacune des éphémérides numériques utilisées.

Ephéméride numérique	Intervalle (JD)	Intervalle	Nombre de jours	Nombre d'années
INPOP10a	2076569.0 – 2826520.0	03 May 973 to 25 Aug 3026	749951	2053.25
DE405	2305424.5 – 2524624.5	09 Dec 1599 to 31 Jan 2200	219200	600.13
DE406	625360.50 – 2816848.5	23 Feb -3001 to 2 March 3000	2191488	5999.96

1. Les orbites des trois plus gros objets de la ceinture principale d'astéroïdes, à savoir (1) Cérès, (2) Pallas et (4) Vesta ont été intégrées en considérant les perturbations gravitationnelles du Soleil, des huit planètes, de la Lune et de Pluton. Ces résultats préliminaires ont alors été ajustés à des polynômes de Chebyshev.
2. Les orbites des 297 autres astéroïdes ont été ensuite intégrées en considérant les perturbations gravitationnelles du Soleil, des huit planètes, de la Lune, Pluton, Cérès, Pallas et Vesta. Ces résultats ont alors été ajustés à des polynômes de Chebyshev, donnant ainsi les éphémérides planétaires.

En plus de l'influence des 300 plus gros perturbateurs (effets sur les planètes telluriques) de la ceinture principale, l'effet moyen de 24635 astéroïdes a été introduit dans la compilation des éphémérides INPOP10a [Fienga et al., 2010]. Il a été modélisé par un anneau de rayon estimé à 2.8 A.U [Kuchynka et al., 2010] ayant une inclinaison initiale nulle par rapport au plan invariable⁵.

Les paramètres utilisés pour chacune des éphémérides, DE405/406 et INPOP10a, sont donnés dans la Table 2.2.

Pour chacune des deux éphémérides, deux cas de figure ont été considérés pour la détermination de l'orientation du plan invariable par rapport à l'ICRF (équateur-origine) et à l'équinoxe-écliptique à l'époque J2000.0 :

1. évaluation de son inclinaison et de son nœud ascendant sur tout l'intervalle de temps disponible pour les éphémérides (Table 2.1), en considérant le système suivant : Soleil, les huit planètes⁶ et la planète naine (134340) Pluton (Sect. 2.4.1).
2. évaluation de son inclinaison et de son nœud sur l'intervalle de temps [1950.0,2050.0], en introduisant en plus l'influence des petits corps (1) Cérès, (2) Pallas et (4) Vesta (Sect. 2.4.2).

Dans les deux cas, l'orientation (inclinaison (Eq. 2.5) et nœud (Eq. 2.6)) est calculée avec un pas d'1 jour sur l'intervalle concerné.

On notera \mathbf{L}_{ecl} (respectivement, \mathbf{L}_{ICRF}), le moment angulaire total du système par rapport à l'écliptique-équinoxe J2000.0 (respectivement, l'ICRF).

Les éphémérides de positions planétaires étant données par rapport à l'ICRS, le passage à l'écliptique-équinoxe de l'époque J2000.0 pour le vecteur moment angulaire est donné par :

$$\mathbf{L}_{\text{ecl}} = \mathbf{R}_x(\varepsilon)\mathbf{R}_z(\varphi)\mathbf{L}_{\text{ICRF}} \quad (2.10)$$

⁵d'inclinaison égale à 23°00'32'' et une longitude du nœud ascendant à 3°51'9'', par rapport à l'ICRF.

⁶Dans le reste de ce chapitre, sauf précision contraire, quand je parlerai des planètes ; la Terre sera remplacée par le Barycentre Terre-Lune (EMB : Earth-Moon Barycentre).

TAB. 2.2: Constantes utilisées pour la compilation des éphémérides numériques à long terme : DE405 / DE406 [Standish, 1998] et INPOP10a.

Références. ⁽¹⁾ [Fienga et al., 2010] ; ⁽²⁾ [Luzum et al., 2011].

Constante	Description	DE405/406	INPOP10a
AU (km)	unité astronomique	149597870.691	¹ 149597870.6910
GM_{\odot} ($km^3.s^{-2}$)	Constante gravitationnelle héliocentrique	1327124400 17.987	¹ 1327124400 55
GM_E ($m^3.s^{-2}$)	Constante gravitationnelle géocentrique		¹ $3.986004414 \times 10^{14}$
EMRAT	Ratio of the mass of the Earth to the Moon	81.300 56	² 81.300 5700
M_{\odot}/M_{Me}	Ratio masse du Soleil à masse de Mercure	6023600.	² 6023600.
M_{\odot}/M_{Ve}	Ratio of the mass of the Sun to Venus	408523.71	² 408523.71 9
M_{\odot}/M_E	Ratio of the mass of the Sun to the Earth	332946.050895	
M_{\odot}/M_{Ma}	Ratio of the mass of the Sun to Mars	309870 8.	² 309870 3.59
M_{\odot}/M_J	Ratio of the mass of the Sun to Jupiter	1047.3486	² 1047.3486 44
M_{\odot}/M_{Sa}	Ratio of the mass of the Sun to Saturne	3497. 888	² 3497. 9018
M_{\odot}/M_U	Ratio of the mass of the Sun to Uranus	22902.98	² 22902.98
M_{\odot}/M_N	Ratio of the mass of the Sun to Neptune	19142. 24	² 19142. 26
M_{\odot}/M_P	Ratio of the mass of the Sun to (134340) Pluton	135200000.	² 136566000.
M_{Ceres}/M_{\odot}	Ratio of the mass of (1) Ceres to the Sun	4.7×10^{-10}	¹ 4. 75836 $\times 10^{-10}$
M_{Pallas}/M_{\odot}	Ratio of the mass of (2) Pallas to the Sun	1.0×10^{-10}	¹ 1.1 1394 $\times 10^{-10}$
M_{Vesta}/M_{\odot}	Ratio of the mass of (4) Vesta to the Sun	1.3×10^{-10}	¹ 1.3 3137 $\times 10^{-10}$

Cette transformation (Fig. 2.3) faisant intervenir les deux matrices suivantes :

$$R_z(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

et

$$R_x(\varepsilon) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varepsilon & \sin \varepsilon \\ 0 & -\sin \varepsilon & \cos \varepsilon \end{pmatrix},$$

L'obliquité ε étant définie comme l'angle entre l'équateur terrestre et le plan de l'écliptique ; φ étant le biais longitudinal, l'origine de l'ICRF ne correspondant pas à l'équinoxe de l'époque. Les valeurs de ces paramètres pour chaque éphéméride sont données Table 2.3.

TAB. 2.3: Paramètres de passage de l'ICRF à l'écliptique-équinoxe J2000.0 [Simon, 2011].

Paramètre	DE405/DE406	INPOP10a
φ	$-0''.05028$	$-0''.0518785$
ε	$23^{\circ}26'21''.40960$	$23^{\circ}26'21''.411361$

Contrairement aux éphémérides de position des planètes et de la planète naine (134340) Pluton, les éphémérides de position des petits corps (1) Cérés, (2) Pallas et (4) Vesta ne seront pas extraites directement à partir de fichiers Accès Direct obtenus par ajustements de polynômes de

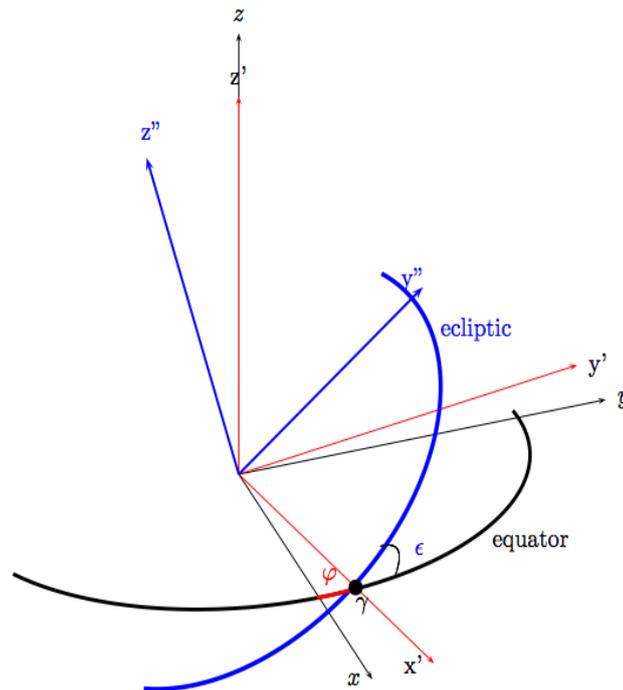


FIG. 2.1: Figure montrant la transformation de coordonnées du repère ICRF (xyz sur la figure) à l'écliptique-équinoxe ($x'y'z''$ sur la figure) de l'époque. Dans un premier temps, nous appliquons la transformation $R_z(\varphi)$, puis dans un second temps nous appliquons la transformation $R_{x'}(\epsilon)$ [Souami and Souchay, 2012].

Chebychev, comme explicité plus haut. Elles seront fournies par le biais du générateur d'éphémérides de l'IMCCE [IMCCE, 2011]⁷.

2.4 Orientation du Plan Invariable (IP)

Comme explicité Sect. 2.3.3, nous avons considéré deux cas de figures. Par souci de simplicité du texte, je reprendrai ici les mêmes appellations que [Souami and Souchay, 2012], à savoir :

- système basique (**SB**), pour le système Soleil, les huit planètes et (134340) Pluton, considéré sur l'intervalle entier fourni par chaque éphéméride (Table 2.1).
- système plus complet (**SPC**), pour le système : Soleil, les huit planètes, (134340) Pluton, (1) Cérès, (2) Pallas et (4) Vesta.

2.4.1 Cas du système basique (SB)

Pour chacune des éphémérides numériques DE405/406 et INPOP10a, sont présentées (Table 2.4) les valeurs maximales de l'inclinaison i et de la longitude du nœud ascendant Ω du plan invariable (**IP**) par rapport à l'ICRF [Ma et al., 2009] et à l'écliptique-équinoxe J2000.0.

⁷http://www.imcce.fr/fr/ephemerides/formulaire/form_ephepos.php

Comme rappelé Sect. 2.2, si notre système (ici 10-corps pour le système (SB)) était isolé le moment angulaire total serait conservé et l'orientation de ce plan fixe par rapport aux coordonnées spatiales et temporelles. Cependant, des variations temporelles sont observées dans l'orientation de l'IP. Je m'intéresserai à la nature de ces variations par rapport à l'ICRF (Fig. 2.2 et 2.4) et par rapport à l'écliptique-équinoxe J2000.0 (Fig. 2.3).

TAB. 2.4: (SB) : pour DE405/406 et INPOP10a sur les intervalles de temps correspondants (Table 2.1) : les valeurs maximales et minimales pour i et Ω ainsi que les variations temporelles correspondantes Δi et $\Delta\Omega$.

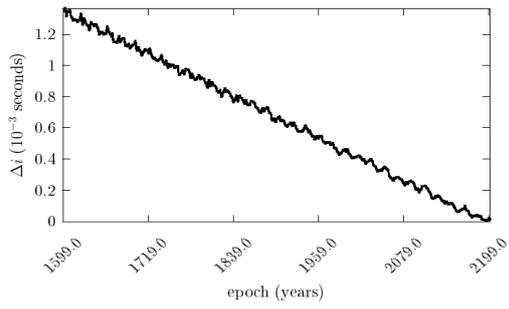
	DE405		DE406		INPOP10a	
	Ecliptic-equinox	ICRF	Ecliptic-equinox	ICRF	Ecliptic-equinox	ICRF
minimal i	1°34'43".33115	23°0'31".98185	1°34'43".33064	23°0'31".97992	1°34'43".31883	23°0'31".97657
minimal i (°)	1°.57870309	23°.00888384	1°.57870295	23°.00888331	1°.57869967	23°.00888238
maximal i	1°34'43".33129	23°0'31".98321	1°34'43".33148	23°0'31".99351	1°34'43".32005	23°0'31".98120
maximal i (°)	1°.57870313	23°.00888422	1°.57870319	23°.00888708	1°.57870001	23°.00888366
Δi (mas)	0.1419459	1.3645984	0.8424548	13.5924536	1.2217759	4.6309134
minimal Ω	107°34'56".14530	3°51'9".45884	107°34'55".76351	3°51'9".45769	107°34'56".38804	3°51'9".41993
minimal Ω (°)	107°.58226	3°.85262745	107°.58215653	3°.85262713	107°.58233001	3°.85261664
maximal Ω	107°34'56".19574	3°51'9".45968	107°34'56".26643	3°51'9".46523	107°34'56".57119	3°51'9".42587
maximal Ω (°)	107°.58227	3°.85262769	107°.58229623	3°.85262923	107°.58238088	3°.85261829
$\Delta\Omega$ (mas)	50.4331802	0.8459849	502.9163810	7.5364930	183.1441989	5.9418886

Les éphémérides de positions planétaires ont une précision limitée par les données observationnelles, 0'.001 pour les planètes internes par exemple dans le cas de DE405 [Standish, 1998]. Ces imprécisions se retrouveront également dans le calcul du moment angulaire et par conséquent de l'orientation de l'IP. Cependant, on pourra observer un accord entre les résultats obtenus en utilisant les différentes éphémérides (Table 2.4).

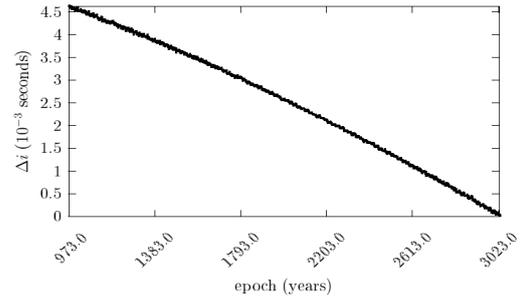
Orientation par rapport à l'ICRF

Les variations temporelles dans l'orientation de l'IP par rapport à l'ICRF sont tracées Fig.2.2(a) et 2.2(c) sur 600.13 ans pour DE405, Fig.2.2(b) et 2.2(d) sur 2053.25 ans pour INPOP10a et Fig. 2.4 sur 5999.96 ans pour DE406.

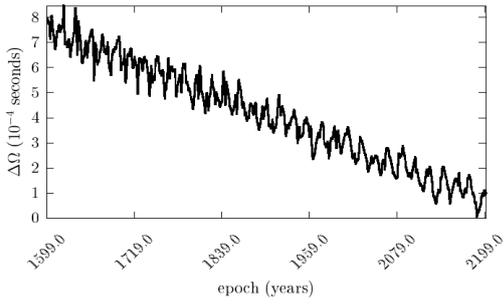
Nous remarquerons que cette variation n'excède pas les 13.59mas pour l'inclinaison et les 7.53mas pour la longitude du nœud ascendant. Ces variations de l'inclinaison Δi , sont fonctions linéaires du temps pour DE405 (Fig.2.2(a)) et INPOP10a (Fig.2.2(b)) avec un taux de variation de $-2''.365252 \times 10^{-6}/an$ pour DE405 et $-2''.255406 \times 10^{-6}/an$ pour INPOP10a. Cependant dans le dernier cas, un ajustement quadratique semble plus approprié.



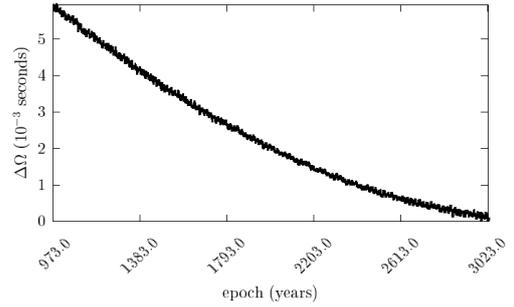
(a) $\Delta i = 0$ correspond à $i = 23^\circ 0' 31''.98185$



(b) $\Delta i = 0$ correspond à $i = 23^\circ 0' 31''.97657$

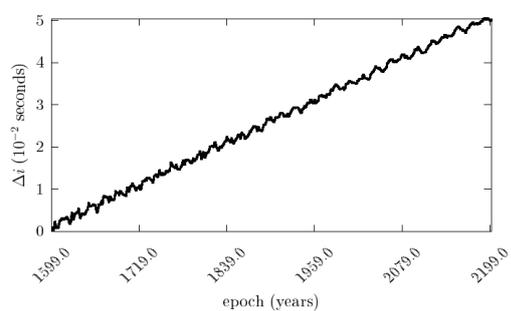


(c) $\Delta\Omega = 0$ correspond à $\Omega = 3^\circ 51' 9''.45913$

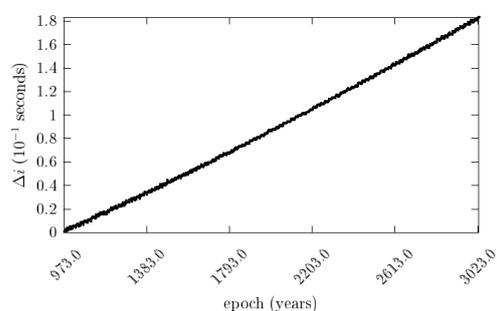


(d) $\Delta\Omega = 0$ correspond à $\Omega = 3^\circ 51' 9''.41993$

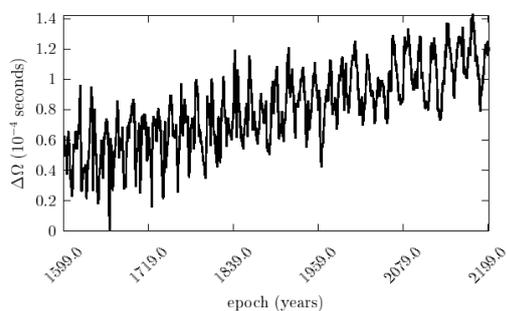
FIG. 2.2: Variations temporelles Δi et $\Delta\Omega$ dans l'orientation de l'**IP** par rapport à l'ICRF : dans le cas de DE405 (respectivement Fig. 2.2(a) et 2.2(c)) et INPOP10a (respectivement Fig. 2.2(b) et 2.2(d)).



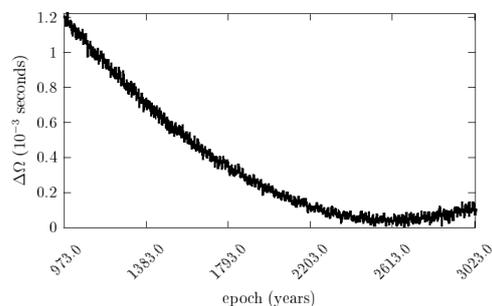
(a) $\Delta i = 0$ correspond à $i = 1^\circ 34' 43''.33115$



(b) $\Delta i = 0$ correspond à $i = 1^\circ 34' 43''.31883$



(c) $\Delta \Omega = 0$ correspond à $\Omega = 107^\circ 34' 56''.14530$

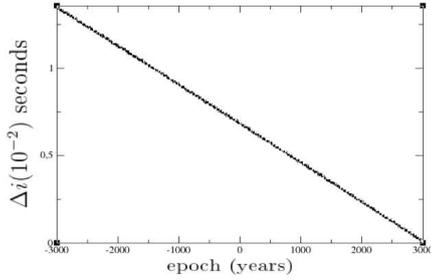


(d) $\Delta \Omega = 0$ correspond à $\Omega = 107^\circ 34' 56''.38804$

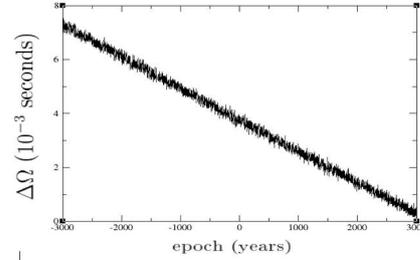
FIG. 2.3: Variations temporelles Δi et $\Delta \Omega$ dans l'orientation de l'IP par rapport à l'écliptique-équinoxe J2000.0 : dans le cas de DE405 (respectivement Fig. 2.3(a) et 2.3(c)) et INPOP10a (respectivement Fig. 2.3(b) et 2.3(d)).

Les variations du nœud $\Delta\Omega$ quant à elles, sont linéaires pour DE405 (Fig.2.2(c)) avec une pente de $1''.4096694 \times 10^{-6}/y$ et quadratiques pour INPOP10a (Fig.2.2(d)).

Enfin pour DE406, on observera une variation linéaire de Δi avec une pente de $-2''.265424036 \times 10^{-6}/an$ (Fig.2.4(a)), résultat proche de celui trouvé pour INPOP10a ($-2''.255406 \times 10^{-6}/an$).



(a) $\Delta i = 0$ correspond à $i = 23^{\circ}0'31''.97992$.



(b) $\Delta\Omega = 0$ correspond à $\Omega = 3^{\circ}51'9''.45769$

FIG. 2.4: Pour DE406, dans le cas du (SB) : variations temporelles de l'inclinaison Δi (Fig. 2.4(a)) et de $\Delta\Omega$ (Fig. 2.4(b)) de l'IP par rapport à l'ICRF.

Orientation par rapport à l'écliptique-équinoxe J2000.0

Les variations temporelles dans l'orientation de l'IP par rapport à l'écliptique-équinoxe J2000.0 sont tracées Fig.2.3(a) et 2.3(c) pour DE405, Fig.2.3(b) et 2.3(d) pour INPOP10a. On remarquera qu'elles sont de $1.22mas$ pour Δi , et plus importantes que dans le cas précédent par rapport à l'ICRF, jusqu'à $503mas$ pour $\Delta\Omega$.

Pour Δi , la variation sera linéaire pour DE405 (Fig.2.3(a)) et INPOP10a (Fig.2.3(b)). Un comportement quadratique sera observé pour $\Delta\Omega$, pour INPOP10a (Fig.2.3(d)). Une analyse plus détaillée de ces variations est présentée dans [Souami and Souchay, 2012] (Annexe B).

Comparaison aux précédentes études

La dernière étude de ce problème avant [Souami and Souchay, 2012] remonte à [Burkhardt, 1982]. Ce dernier, en utilisant les éphémérides numériques DE 96/102/108 et 110 aura étudié la détermination de l'orientation du plan invariable par rapport à : l'écliptique-équinoxe B1950.0 et J2000.0, l'équateur-équinoxe B1950.0 et J2000.0.

Il s'intéressa également aux variations temporelles observées pour l'orientation de l'IP. On trouvera, Fig 2.5, les courbes des variations temporelles Δi et $\Delta\Omega$ obtenues par [Burkhardt, 1982], pour les éphémérides DE96 et DE102. Pour DE102, qui s'étale sur l'intervalle de temps [1497,2249] (JD 2419056.5 - JD 2542800.5), une variation sur une base linéaire (accompagnée d'oscillations) de $4''.77 \times 10^{-4}$ est observée pour i et $7''.44 \times 10^{-2}$ pour Ω , soit à des taux respectifs de $1''.4079 \times 10^{-6}/an$ et $2''.1960 \times 10^{-4}/an$.

La Table 2.6 résume les variations temporelles (linéaires) observées pour i de l'IP par rapport à l'écliptique. On remarquera une nette diminution de ces variations pour les éphémérides les plus récentes d'un facteur 6.6 entre DE102 et DE405. Le fait que le taux de cette variation soit

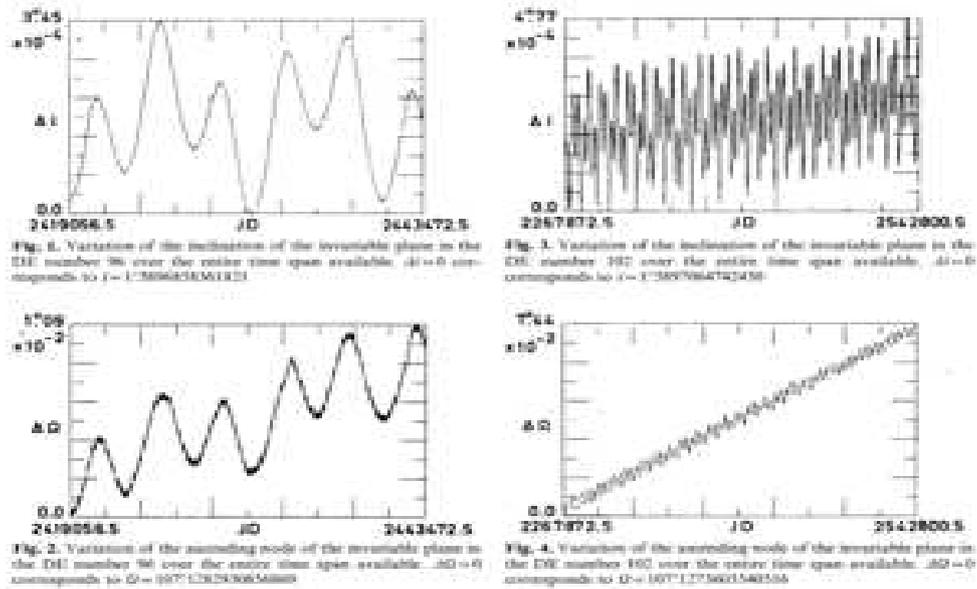


FIG. 2.5: Variations temporelles de i et Ω par rapport à l'écliptique-équinoxe B1950.0 pour DE96 et DE102 [Burkhardt, 1982].

plus élevé pour DE406 que pour DE405, malgré le fait que ces éphémérides aient été compilées à partir des mêmes conditions initiales, pourrait s'expliquer par la troncature dans l'ordre des polynômes de Chebychev pour DE406.

Burkhardt parlera [Burkhardt, 1982] des oscillations observées dans les variations temporelles, et dira observer une période qui correspond à la période orbitale de Jupiter. Cependant, les résultats de l'analyse en fréquences présentés lors de la session poster des Journées Systèmes de Référence en Septembre 2011 à Vienne, [Souami and Souchay, 2011], n'a montré aucune périodicité.

TAB. 2.6: Variations Δi de l'IP par rapport à l'écliptique, pour DE 96/102/405 et 406.

Références :¹ :[Burkhardt, 1982] ; ² :[Souami and Souchay, 2012]

Ephéméride	nombre d'années	Référentiel	$\Delta i(mas)$	$\frac{\Delta i}{\Delta t} (''10^{-6}/an)$
DE96 ¹	66.85	écliptique-équinoxe B1950.0	0.4770127	7.13
DE102 ¹	752.75	écliptique-équinoxe B1950.0	0.345313	0.4591
DE405 ²	2053.25	écliptique-équinoxe J2000.0	0.1419459	0.0691
DE406 ²	5999.96	écliptique-équinoxe J2000.0	0.8424548	0.1404

Les variations temporelles observées s'expliquent partiellement par la précision des éphémérides utilisées. Cependant, nous ne pouvons ignorer le fait que le système utilisé dans les calculs pour le système (SB) n'est pas vraiment un système isolé. En effet, nous avons ignoré l'effet des trois plus gros petits corps de la ceinture principale d'astéroïdes, à savoir la planète naine (1) Cérès et les deux plus gros astéroïdes (4) Vesta et (2) Pallas. Or l'effet de ces trois corps a été pris en compte lors de la compilation des éphémérides (Sect. 2.3.3).

Dans la Sect.2.4.2, j'introduis ces trois derniers corps et évalue leur effet sur l'orientation du plan invariable.

2.4.2 Cas du système dit plus complet (SPC)

Le système considéré ici est le suivant : le Soleil, les huit planètes, les planètes naines Pluton et Cérés et les deux astéroïdes Pallas et Vesta. La démarche suivie est celle présentée dans la Sect. 2.4.1 et ce pour les éphémérides DE405 et INPOP10a sur l'intervalle de temps [1950.0, 2050.0].

Les valeurs extrémales pour i et Ω ainsi que les variations correspondantes sur l'intervalle de temps, dans le cas du (SPC), sont présentées (Table 2.7).

TAB. 2.7: Dans le cas du (SPC), pour DE405/406 et INPOP10a : les valeurs maximales de i et Ω , ainsi que les variations correspondantes Δi et $\Delta\Omega$ sur l'intervalle de temps [1950.0,2050.0].

Ephemeris	DE405		INPOP10a	
	Ecliptic-equinox	ICRF	Ecliptic-equinox	ICRF
minimal i	1°34'43".34057	23°0'31".97900	1°34'43".32868	23°0'31".97526
minimal $i(^{\circ})$	1°.57870571	23°.00888305	1°.57870241	23°.00888201
maximal i	1°34'43".34061	23°0'31".97904	1°34'43".32877	23°0'31".97531
maximal $i(^{\circ})$	1°.57870572	23°.00888306	1°.57870243	23°.00888203
Δi (mas)	3.8791×10^{-2}	3.86817×10^{-2}	8.71123×10^{-2}	5.1558×10^{-2}
minimal Ω	107°34'56".21622	3°51'9".48165	107°34'56".52916	3°51'9".44489
minimal $\Omega(^{\circ})$	107°.58228228	3°.85263379	107°.58236921	3°.85262358
maximal Ω	107°34'56".21762	3°51'9".48174	107°34'56".53142	3°51'9".44512
maximal $\Omega(^{\circ})$	107°.58228267	3°.85263381	107°.58236983	3°.85262364
$\Delta\Omega$ (mas)	1.40935	9.4064×10^{-2}	2.25413	2.28396×10^{-1}

Ici encore, des variations temporelles dans l'orientation de l'IP sont observées. L'analyse que je présente dans les prochains paragraphes concerne les variations Δi et $\Delta\Omega$ par rapport à l'ICRF (équateur et origine).

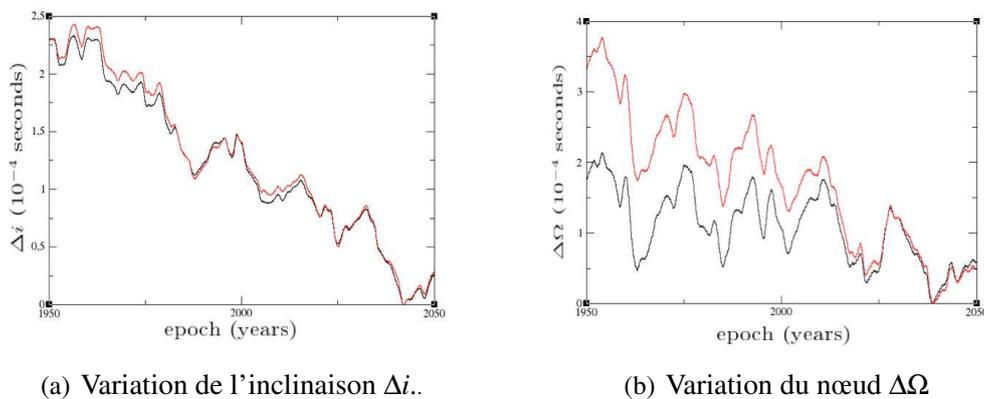


FIG. 2.6: Dans le cas du (SB), sur l'intervalle de temps [1950.0,2050.0] : DE405 (en noir) et INPOP10a (en rouge).

La figure 2.6, présente la variation de i et Ω sur l'intervalle de temps [1950.0,2050.0] dans le cas du (SB) (traité dans la Sect. 2.4.1), pour DE405 en noir et INPOP10a en rouge.

L'introduction des trois petits corps de la ceinture principale se fera de manière progressive. Ils seront introduits un à un, afin d'évaluer leurs effets individuels, dans l'ordre suivant : Cérès, Vesta, Pallas ; du plus massif au moins massif (Table 2.2).

M.B.O	INPOP10a		DE405	
	Ω ($''10^{-4}$)	i ($''10^{-4}$)	Ω ($''10^{-4}$)	i ($''10^{-4}$)
none	2.43	3.77	2.33	2.14
C	5.15	0.84	3.44	0.75
CV	2.41	0.67	1.10	0.58
CVP	2.28	0.51	0.94	0.38

TAB. 2.8: Variations temporelles maximales Δi et $\Delta\Omega$ dans l'orientation de l'(IP) sur l'intervalle de temps [1950.0,2050.0]. None : correspond au cas (SB) ; C : ce dernier après l'introduction de Cérès ; CV : après introduction de Vesta ; CVP : correspond au (SPC).

Variations temporelles de l'inclinaison

Dans le cas du (SB), la variation de l'inclinaison est de l'ordre de $2'' \cdot 14 \times 10^{-4}$ et $3'' \cdot 77 \times 10^{-4}$ sur 100 ans, respectivement pour DE405 et INPOP10a. On remarquera une nette diminution après l'introduction de Cérès (Table 2.8 et Fig. 2.7) d'un facteur 2.85 dans le cas de DE405 et 4.48 dans le cas d'INPOP10a. Cette variation continuera à se tasser après l'introduction de Vesta et Pallas (Fig. 2.7), jusqu'à atteindre $0'' \cdot 38 \times 10^{-4}$ et $0'' \cdot 51 \times 10^{-4}$, respectivement pour DE405 et INPOP10a.

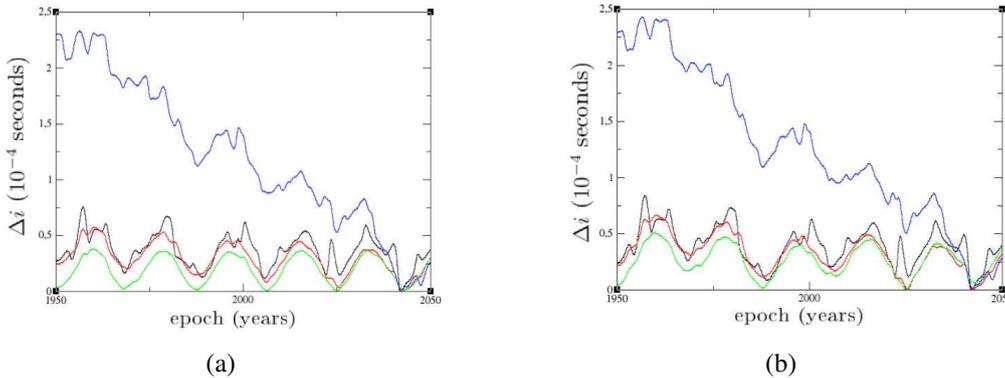


FIG. 2.7: Variation temporelle Δi de l'IP par rapport à l'équateur de l'ICRF : Fig. 2.7(a) : pour DE405 ; Fig. 2.7(b) : pour INPOP10a. En blue, (SB) ; en noir, (SB) + Cérès ; en rouge, (SB) + Cérès & Vesta ; en vert, (SPC).

Variations temporelles du nœud

Dans la cas de la longitude du nœud ascendant, et contrairement à Δi l'introduction de Cérès (seul) engendre l'augmentation de $\Delta\Omega$ (Fig. 2.8 et Table 2.8) et ce quelle que soit l'éphéméride (INPOP10a et DE405) (Table 2.8).

Pour le système à 10 corps (**SB**) (en bleu dans la Fig. 2.8) les variations pour DE405 et INPOP10a sont respectivement $2''.33 \times 10^{-4}$ et $2''.43 \times 10^{-4}$. Elles seront de $3''.44 \times 10^{-4}$ et $5''.15 \times 10^{-4}$ après l'introduction de Cérès (en noir dans la Fig. 2.8) pour finir par se tasser à $1''.10 \times 10^{-4}$ et $2''.41 \times 10^{-4}$ après l'introduction de (4) Vesta (courbes en rouge dans la Fig. 2.8).

Ceci est probablement dû à la forte interaction entre les orbites chaotiques de Cérès et Vesta [Laskar et al., 2011]. En effet, en introduisant uniquement Cérès, notre système (**SB** + Cérès) est loin d'être un système isolé en raison de la forte interaction entre Cérès et Vesta [Laskar et al., 2011].

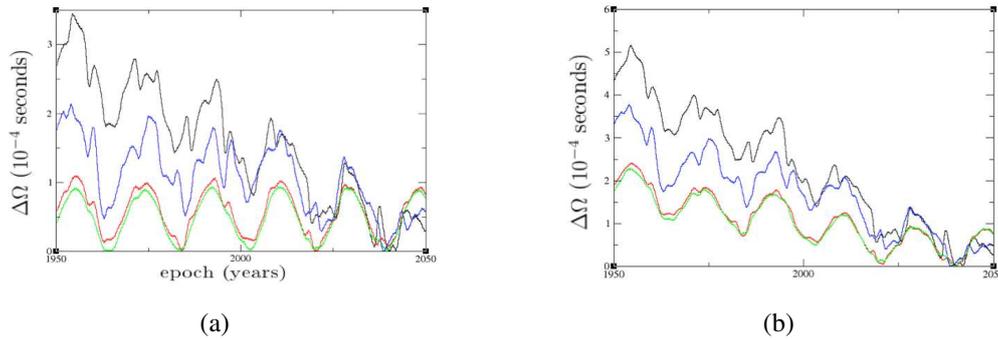


FIG. 2.8: Après introduction des petits-corps, variation temporelle de l'orientation de l'IP par rapport à l'équateur de l'ICRF

Variation temporelle $\Delta\Omega$ de l'IP par rapport à l'équateur de l'ICRF : Fig. 2.8(a) : pour DE405 ; Fig. 2.8(b) : pour INPOP10a. En bleu, (**SB**) ; en noir, (**SB**) + Cérès ; en rouge, (**SB**) + Cérès & Vesta ; en vert, (**SPC**).

Contrairement au cas du système **SB**, on remarquera une périodicité dans les variations temporelles de i et Ω et ce avec une période de 18.6 ans qui nous fait penser au cycle de précession de la ligne des nœuds de l'orbite lunaire. Celle-ci devient d'autant plus flagrante après l'introduction des effets des trois petits corps de la ceinture principale (Fig 2.7 et 2.8). Tout laisserait croire qu'elles seraient dues aux éphémérides. En effet, pour les éphémérides planétaire les effets du Système Terre-Lune sont pris en considération lors de leur compilation, alors que pour les éphémérides des petits corps [IMCCE, 2011] le système Terre-Lune est remplacé par le Barycentre Terre-Lune.

2.4.3 Orientation à J2000.0

Dans ce chapitre je me penche sur l'orientation du *plan invariable* à l'époque J2000.0 avec comme but de comparer mes résultats avec ceux de la littérature [Burkhardt, 1982]. Mon but est de définir l'orientation définitive, qui me servira de référence pour la suite de ce manuscrit, par rapport à l'ICRF [Ma et al., 2009] et à l'écliptique-équinoxe J2000.0.

Dans un premier temps, les résultats sont présentés dans le cas du **SB** (Table 2.9), c'est-à-dire celui utilisé par [Burkhardt, 1982]. On commencera par remarquer l'accord entre les résultats obtenus par les éphémérides INPOP10a et DE405. En effet les inclinaisons par rapport à l'équateur de l'ICRF et l'écliptique-équinoxe J2000.0 sont données avec un accord respectivement de

TAB. 2.9: Pour (**SB**), à l'époque J2000.0 : Inclinaison (i) et longitude du nœud ascendant (Ω) de l'IP, par rapport à l'ICRF et à l'écliptique-équinoxe J2000.0.

	DE405 / DE406		INPOP10a		Burkhardt, 1982	
	Ecliptic-equinox	ICRF	Ecliptic-equinox	ICRF	Ecliptic-equinox	Equator-equinox
i	$1^{\circ}34'43''.\{33124/33124\}$	$23^{\circ}0'31''.\{98231/98232\}$	$1^{\circ}34'43''.31903$	$23^{\circ}0'31''.97914$	$1^{\circ}35'13''.86$	$23^{\circ}0'22''.11$
$i(^{\circ})$	$1^{\circ}.\{57870312/57870312\}$	$23^{\circ}.\{00888397/00888398\}$	$1^{\circ}.\{57869973\}$	$23^{\circ}.\{00888309\}$		
Ω	$107^{\circ}34'56''.\{17914/17898\}$	$3^{\circ}51'9''.\{45913/45911\}$	$107^{\circ}34'56''.47403$	$3^{\circ}51'9''.42191$	$107^{\circ}36'30''.8$	$3^{\circ}52'23''.7$
$\Omega(^{\circ})$	$107^{\circ}.\{58227198/58227193\}$	$3^{\circ}.\{85262753/85262754\}$	$107^{\circ}.\{58235389\}$	$3^{\circ}.\{85261719\}$		

3mas et 12mas ; quant au nœud ces valeurs respectives sont de 37mas et 314mas. En ce qui concerne les différences de l'ordre du degré observées avec les résultats de [Burkhardt, 1982], elles s'expliquent par :

- les différences importantes dans les masses utilisées, en particulier pour Pluton : $3.3 \times 10^{-7}M_{\odot}$ pour DE96/102, $7.39 \times 10^{-9}M_{\odot}$ pour DE405.
- les résultats initialement calculés par [Burkhardt, 1982], sont donnés par rapport à l'écliptique-équinoxe B1950.0. Le passage à l'écliptique-équinoxe J2000.0 se fait en appliquant les matrices de précession [Lieske et al., 1977], [Lieske, 1979].
- l'équateur-équinoxe J2000.0 ne correspond pas à l'équateur-origine de l'ICRF [Ma et al., 2009].

Enfin pour le **SPC**, les valeurs des inclinaisons et nœuds rapportées à l'ICRF et l'écliptique-équateur J2000.0 sont données Table 2.10. Les différences observées entre les valeurs de i et Ω entre DE405 et INPOP10a sont les mêmes pour les systèmes **SB** et **SPC**. Elles nous renseignent donc sur les différences entre INPOP10a et DE405.

TAB. 2.10: Pour (**SPC**), à l'époque J2000.0 : Inclinaison (i) et longitude du nœud ascendant (Ω) de l'IP, par rapport à l'ICRF et à l'écliptique-équinoxe J2000.0.

	DE405		INPOP10a	
	Ecliptic-equinox	ICRF	Ecliptic-equinox	ICRF
i at J2000	$1^{\circ}34'43''.34038$	$23^{\circ}0'31''.97893$	$1^{\circ}34'.43''.32849$	$23^{\circ}0'31''.97519$
$i(^{\circ})$ at J2000	$1^{\circ}.\{57870566\}$	$23^{\circ}.\{00888303\}$	$1^{\circ}.\{57870235\}$	$23^{\circ}.\{00888199\}$
Ω at J2000	$107^{\circ}34'56''.22262$	$3^{\circ}51'9''.48107$	$107^{\circ}34'56''.53619$	$3^{\circ}51'9''.44433$
$\Omega(^{\circ})$ at J2000	$107^{\circ}.\{58228062\}$	$3^{\circ}.\{85263363\}$	$107^{\circ}.\{58237116\}$	$3^{\circ}.\{85262342\}$

Enfin, dans le reste de ce manuscrit, l'IP sera :

- par rapport à l'ICRF [Ma et al., 2009] : d'inclinaison $i = 23^{\circ}0'31''.97$, avec une longitude du nœud ascendant $\Omega = 3^{\circ}51'9''.4$.
- par rapport à l'écliptique-équinoxe J2000.0 : d'inclinaison $i = 1^{\circ}34'43''.3$, avec une longitude du nœud ascendant de $\Omega = 107^{\circ}34'56'$.

2.4.4 Contributions individuelles au moment angulaire total

Je me suis également intéressée aux contributions individuelles de chacun des 13 corps constituant le **SPC**, à la norme du moment angulaire total. Les valeurs maximales et minimales de

ces contributions sont présentées dans la Table 2.11. Les contributions les plus importantes sont sans surprise celles dues à Jupiter et Saturne, qui correspondent respectivement à 61% et 25% du moment angulaire total du système. On remarquera un échange de moment important entre Jupiter et le Soleil, la contribution du Soleil oscillant entre 0.1% et $3.4 \times 10^{-4}\%$. La contribution du Barycentre Terre-Lune est elle de l'ordre de $8 \times 10^{-2}\%$, alors que l'effet global des trois petits corps de la ceinture principale d'astéroïdes est de l'ordre de $3.2 \times 10^{-5}\%$.

TAB. 2.11: Pour chacun des 13 corps (du (SPC)) : contributions maximales et minimales (en terme de pourcentage) à la norme du moment angulaire total, sur l'intervalle de temps [1950.0,2050.0] pour DE405 et INPOP10a.

Corps	DE405		INPOP10a	
	min	max	min	max
Soleil	$3.413946 \cdot 10^{-4}$	$1.390732 \cdot 10^{-1}$	$3.413967 \cdot 10^{-4}$	$1.390732 \cdot 10^{-1}$
Mercure	$2.784889 \cdot 10^{-3}$	$2.949411 \cdot 10^{-3}$	$2.784890 \cdot 10^{-3}$	$2.949413 \cdot 10^{-3}$
Vénus	$5.806344 \cdot 10^{-2}$	$5.970013 \cdot 10^{-2}$	$5.806347 \cdot 10^{-2}$	$5.970016 \cdot 10^{-2}$
EMB	$8.510962 \cdot 10^{-2}$	$8.686849 \cdot 10^{-2}$	$8.510967 \cdot 10^{-2}$	$8.686853 \cdot 10^{-2}$
Mars	$1.113641 \cdot 10^{-2}$	$1.129740 \cdot 10^{-2}$	$1.113643 \cdot 10^{-2}$	$1.129742 \cdot 10^{-2}$
Jupiter	61.368898	61.515754	61.368928	61.515784
Saturne	24.925657	24.957143	24.925643	24.957129
Uranus	5.406210	5.407393	5.406213	5.407396
Neptune	7.993727	7.994472	7.993719	7.994465
(134340) Pluton	$1.273950 \cdot 10^{-3}$	$1.274015 \cdot 10^{-3}$	$1.261215 \cdot 10^{-3}$	$1.261279 \cdot 10^{-3}$
(1) Cérés	$2.195344 \cdot 10^{-5}$	$2.213711 \cdot 10^{-5}$	$2.222605 \cdot 10^{-5}$	$2.241200 \cdot 10^{-5}$
(2) Pallas	$4.562694 \cdot 10^{-6}$	$4.599860 \cdot 10^{-6}$	$5.082570 \cdot 10^{-6}$	$5.123970 \cdot 10^{-6}$
(4) Vesta	$5.600394 \cdot 10^{-6}$	$5.653883 \cdot 10^{-6}$	$5.735539 \cdot 10^{-6}$	$5.790319 \cdot 10^{-6}$

2.4.5 Travaux sur l'orientation du plan invariable

Depuis près de deux siècles une douzaine d'études ont, à ma connaissance, été conduites pour la détermination de l'orientation de l'IP. Les résultats de ces études sont présentés Table 2.12.

L'introduction de l'IP comme plan de référence pour la détermination de l'obliquité des planètes, est examinée depuis 2006 par le groupe de travail de l'UAI sur les coordonnées cartographiques et les éléments de rotation WGCCRE (*IAU/IAG Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements*) [Seidelmann et al., 2007] ; en particulier dans le rapport de 2009 [Archinal et al., 2011]. Il est ressorti de ce rapport que le pôle primaire d'une planète est celui qui se situe au nord de l'IP.

TAB. 2.12: Déterminations du plan invariable de 1802 à 2012.

Référence/Auteur	Ω	i	Remarques
Laplace, 1802 [De Laplace, 1878]	102°57'29''	1°35'31''	Ecliptic-Equinoxe 1750.0
Laplace, 1802 [De Laplace, 1878]	102°57'15''	1°35'31''	Ecliptic-Equinoxe 1750.0; élément planétaire à l'époque B1950.0
Pontécoulant, 1834 [See, 1904]	103°8'45''	1°34'16''	Ecliptic-Equinoxe 1800.0;
Pontécoulant, 1834 [See, 1904]	103°8'50''	1°34'15''	Ecliptic-Equinoxe 1800.0; élément planétaire à l'époque J2000.0
Stockwell, 1872 [See, 1904]	106°14'6''.00	1°35'19''.376	Ecliptic-Equinoxe 1850.0
[See, 1904]	106°8'46''.688	1°35'7''.745	Ecliptic-Equinoxe 1850.0
[Innes, 1920]	106°35'1''.08	1°34'59''.42	Ecliptic-Equinoxe 1900.0
[Clemence and Brouwer, 1955]	107°13'3''	1°38'49''	Ecliptic-Equinoxe 1950.0
& [Moutsoulas, 1973]			première introduction de Pluton.
Innes, 1965 [See, 1904]	106°35'1''	1°34'59''	Ecliptic 1900.0
[Burkhardt, 1982]	107°7'38''.5	1°35'22''.94	Ecliptic-Equinoxe B1950.0; Introduction des effets relativistes au 1 ^{er} ordre post-newtonien
[Burkhardt, 1982]	107°36'30''.8	1°35'13''.86	Ecliptic-Equinoxe J2000.0
[Souami and Souchay, 2012]	107°34'56''	1°34'43''.3	Ecliptic-Equinoxe J2000.0 Introduction des effets de : (1) Cérés, (2) Pallas & (4) Vesta.
[Innes, 1920]	3°52'41''.38	23°2'51''.40	Equateur-Equinoxe 1900.0
[Cohen et al., 1973]	4°.04535464438418	23°.0056266863332	Equateur-Equinoxe 1950.0
[Burkhardt, 1982]	3°53'11''.8	23°1'29''.93	Equateur-Equinoxe 1950.0
[Burkhardt, 1982]	3°53'23''.7	23°0'22''.11	Equateur-Equinoxe 2000.0
[Kuchynka et al., 2010]	3°51'9''	23°0'32''	ICRF
[Souami and Souchay, 2012]	3°51'9''.4.	23°0'31''.97	ICRF

2.5 Orientation des planètes par rapport à l'IP

Enfin, pour clore ce chapitre sur l'IP, je compare l'orientation des plans orbitaux des planètes⁸ à l'époque J2000.0 par rapport à l'écliptique-équinoxe J2000.0 et à l'IP. Ces résultats sont donnés dans la Table 2.13, en utilisant les éphémérides planétaires DE405 et INPOP10a utilisées plus haut dans la détermination de l'orientation de l'IP. Une nouvelle détermination de l'orientation de l'IP était donc indispensable.

⁸ici contrairement à tout ce qui précédait dans ce chapitre, je parle de la Terre et non du Barycentre Terre-Lune.

CHAPITRE 2. SYSTÈME DE RÉFÉRENCE : LE PLAN INVARIABLE

TAB. 2.13: A l'époque J2000.0, i et Ω des : planètes, planètes naines, astéroïdes et Soleil par rapport à l'IP et à l'écliptique-équinoxe J2000.0.

	$i(^{\circ})$				$\Omega(^{\circ})$			
	Invariable plane		Ecliptic-equinox		Invariable plane		Ecliptic-equinox	
	DE405	INPOP10a	DE405	INPOP10a	DE405	INPOP10a	DE405	INPOP10a
Mercury	6.3472858	6.3472876	7.0138861	7.0138846	32.2196517	32.2196761	48.1237505	48.1237432
Venus	2.1545441	2.1545480	3.3816623	3.3816620	52.3081499	52.3081811	76.6326812	76.6326727
The Earth	1.5717094	1.5717062	0.0118008	0.0118012	284.5053506	284.5054480	10.6180385	10.6166892
Mars	1.6311858	1.6311871	1.8474386	1.8474388	352.9528964	352.9530452	49.4741336	49.4741195
Jupiter	0.3219652	0.3219657	1.3042508	1.3042472	306.9167004	306.9169730	100.4850212	100.4850283
Saturn	0.9254704	0.9254848	2.4859253	2.4859357	122.2651836	122.2652654	113.6519989	113.6521532
Uranus	0.9946692	0.9946743	0.7722317	0.7722266	308.4427476	308.4428683	73.9992219	73.9988116
Neptune	0.7354155	0.7354109	1.7701940	1.7701783	189.2848872	189.2858832	131.7830269	131.7832001
(134340) Pluto	15.5541473	15.5540987	17.1405780	17.1405259	107.0600642	107.0601401	110.3012095	110.3012757
(1) Cérès	9.1974873	9.1974921	10.6166581	10.6166586	73.5541236	73.5541321	81.2542096	81.2542086
(2) Pallas	34.4340071	34.4340066	35.0629114	35.0629112	172.5129883	172.5129914	173.9695929	173.9695925
(4) Vesta	5.5831363	5.5831401	7.1313625	7.1313627	100.1146622	100.1146572	104.3314594	104.3314629

CHAPITRE 3

ASTÉROÏDES DE LA CEINTURE PRINCIPALE : STRUCTURE À GRANDE ÉCHELLE

"You can't rush science, Gibbs ! You can yell at it
and scream at it, but you can't rush it. "
- Abby Sciuto (NCIS episod).

Nous dénombrons aujourd'hui 524.541 astéroïdes¹ (Sect. 1.6). Il existe différentes populations (groupements) d'astéroïdes dans le système solaire. Je commencerai par faire le point sur les groupements les plus évidents en éléments osculateurs, puis je m'intéresserai à la notion de famille et enfin à la distribution de ces objets en matière de plans orbitaux ainsi qu'aux séculaires (dus à Jupiter et à Saturne).

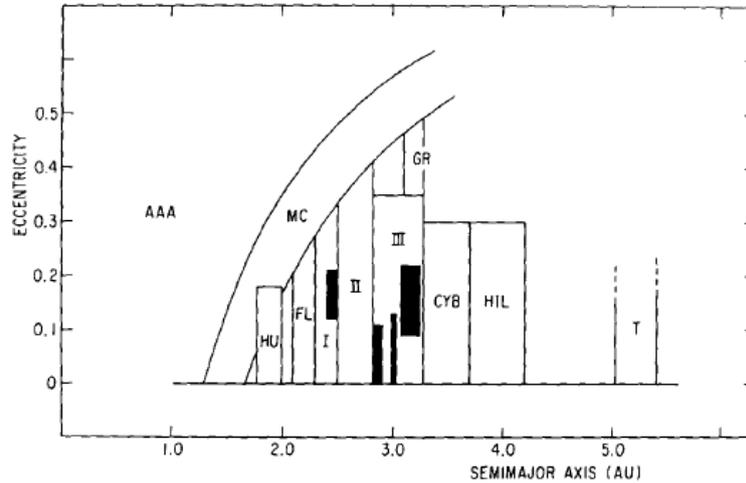
Plusieurs auteurs se sont intéressés à la question de distribution des astéroïdes. Je citerai certaines de ces contributions tout au long de chapitre.

3.1 Les groupements en matière d'éléments osculateurs

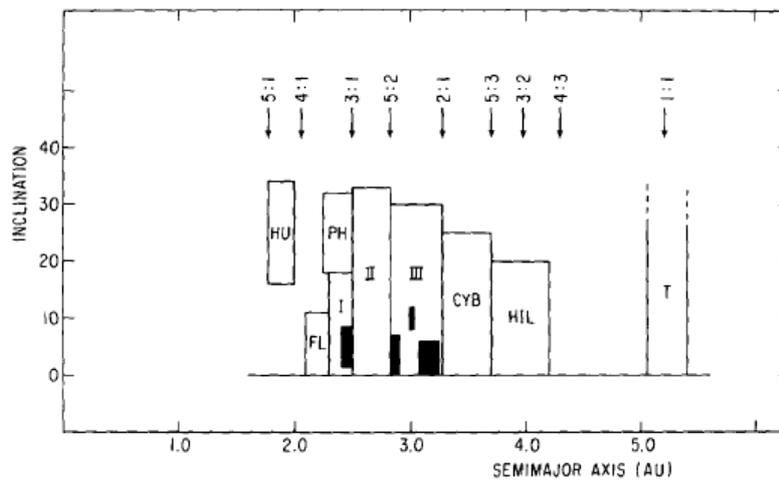
Zellner et ses collaborateurs [Zellner et al., 1985] se sont penchés sur la question des populations d'astéroïdes en examinant la distribution de 2.888 petits corps numérotés connus à l'époque (données TRIAD - The Tuscon Revised Index of Asteroid Data).

En examinant les groupements aux travers de leurs demi-grands axes, excentricités et inclinaisons, ils définissent 19 zones qu'ils estiment représentatives des propriétés de ces astéroïdes.

¹<http://hamilton.dm.unipi.it/astdys/index.php?pc=0> : accès le mardi 14 août 2012.



(a) Les différentes zones dans l'espace (demi-grand axe, excentricité). En noir sont représentées les zones Nysa, Koronis, Eos et Themis. Les zones Pallas et Phocaea ne sont pas représentées [Zellner et al., 1985].



(b) Les différentes zones dans l'espace (demi-grand axe, inclinaison). En noir sont représentées les zones Nysa, Koronis, Eos et Themis. La zone Griqua n'est pas représentée. Les lacunes de Kirkwood, résultantes de commensurabilités (résonances de moyens mouvements) avec Jupiter, [Zellner et al., 1985] sont indiquées par des flèches.

FIG. 3.1: Les différentes zones d'astéroïdes identifiées dans [Zellner et al., 1985]. Représentation dans l'espace : (a,e) Fig. 3.1(a); (a,i) Fig 3.1(b).

Zone	Description	Limites en a	Limites en ω	Limites en i	Nombre d'astéroïdes		
					[Zellner et al., 1985]	Aujourd'hui	%
AAA	Apollo-Amor-Aten	—	$q=a(1-e) \leq 1.30$	—	36	9109	1.65
HU	Hungarias	$1,78 \leq a \leq 2.00$	$e \leq 0.18$	$16^\circ \leq i \leq 34^\circ$	30	5345	0.96
MC	Mars crossers	—	$q \leq 1.666$	—	29	8351	1.52
FL	Floras	$2.10 \leq a \leq 2.30$	Délimités par les MCs	$i \leq 11^\circ$	421	52501	9.58
PH	Phocaeas	$2.25 \leq a \leq 2.50$	$e \geq 0.10$	$18^\circ \leq i \leq 32^\circ$	62	4670	0.85
NY	Nysas	$2.41 \leq a \leq 2.50$	$0.12 \leq e \leq 0.21$	$1^\circ.5 \leq i \leq 4^\circ.3$	44	10366	1.89
I	Main Belt	$2.30 \leq a \leq 2.50$	Délimités par les MCs	$i \leq 18^\circ$	316	109158	19.92
PAL	Pallas Zone	$2.50 \leq a \leq 2.82$	Délimités par les MCs	$33^\circ \leq i \leq 38^\circ$	4	442	0.08
Ia	Main Belt	$2.500 \leq a \leq 2.706$	Délimités par les MCs	$i \leq 33^\circ$	455	122594	22.37
Ib	Main Belt	$2.706 \leq a \leq 2.82$	Délimités par les MCs	$i \leq 33^\circ$	298	56883	10.38
KOR	Koronis zone	$2.83 \leq a \leq 2.91$	$e \leq 0.11$	$i \leq 3^\circ.5$	86	5380	0.98
EOS	Eos Zone	$2.99 \leq a \leq 3.03$	$0.01 \leq e \leq 0.13$	$8^\circ \leq i \leq 12^\circ$	144	5604	1.02
IIIa	Main Belt	$2.82 \leq a \leq 3.03$	$e \leq 0.35$	$i \leq 30^\circ$	189	43361	7.91
THE	Themis Zone	$3.08 \leq a \leq 3.24$	$0.09 \leq e \leq 0.22$	$i \leq 3^\circ$	165	7245	1.32
GR	Griquas	$3.10 \leq a \leq 3.27$	$e \geq 0.35$	No test	3	625	0.11
IIIb	Main Belt	$3.03 \leq a \leq 3.27$	$e \leq 0.35$	$i \leq 30^\circ$	480	97449	17.78
CYB	Cybele Group	$3.27 \leq a \leq 3.70$	$e \leq 0.30$	$i \leq 25^\circ$	51	1814	0.32
HIL	Hildas	$3.70 \leq a \leq 4.20$	$e \leq 0.30$	$i \leq 20^\circ$	34	2303	0.41
T	Jupiter Trojans	$5.05 \leq a \leq 5.40$	No test	No test	35	4030	0.73
TNO	Trans-Neptunians	$a \geq 5.5$ & $q < 1.3$	No test	No test		1252	0.22

TAB. 3.1: Groupements d'astéroïdes en terme d'éléments osculateurs.

Nous trouverons table 3.1² la description de ces 19 zones ainsi que leurs limites en demi-grand axe, excentricité et inclinaison. Les trois dernières colonnes donnent le nombre d'astéroïdes trouvés par [Zellner et al., 1985], ainsi que le nombre d'astéroïdes que je trouve aujourd'hui sur la population actuelle de 524.541 astéroïdes et le pourcentage que cela représente sur tout l'échantillon.

Les figures 3.1(a) (demi-grand axe en fonction de l'inclinaison) et 3.1(b) (demi-grand axe en fonction de l'excentricité), extraites elles aussi de [Zellner et al., 1985]³, retranscrivent les zones définies Table 3.1⁴. Les zones en noir représentent les domaines Nysa, Koronis, Eos et Themis. La zone Griqua n'est pas représentée sur la figure 3.1(a).

Dans les paragraphes suivants, je présenterai une description brève de chacune de ces zones.

3.1.1 Les géocroiseurs

Plus communément connus sous le nom de NEA (Near Earth Asteroids), ils correspondent à la zone AAA (Table 3.1). En 2003, un quatrième groupe est venu se rajouter aux AAA (Apollo-Amor-Aten) suite à la découverte de l'astéroïde (163693) Atira : le groupe des Atiras.

Les caractéristiques définissant ces quatre groupes de géocroiseurs sont données Table 3.2⁵.

Groupe	Caractéristiques
Apollo	$a > 1.0 \text{ ua} ; q = a(1-e) \leq 1.017 \text{ ua}$
Aten	$a < 1.0 \text{ ua} ; Q = a(1+e) > 0.983 \text{ ua}$
Amor	$a > 1.0 \text{ ua} ; 1.02 < q \leq 1.3 \text{ ua}$
Atira	$a < 1.0 \text{ ua} ; q < 0.983 \text{ ua}$

TAB. 3.2: Groupements de la population des géocroiseurs.

Ces populations sont définies par un périhélie $q = a(1 - e) \leq 1,3 \text{ au}$ (Table 3.1) :

- **Les Apollos**, du nom de l'astéroïde (1862) Apollo⁶. Ces objets croisent régulièrement l'orbite de la Terre, et pour n'en citer que quelques uns : (1566) Icarus, (4179) Toutatis et (6489) Golevka. De part leur caractéristiques orbitales, ces objets sont les plus faciles à observer et représentent donc plus de 60% des NEAs identifiés.
- **Les Atens**, du nom de l'astéroïde (2062) Aten⁷. Le membre le plus illustre de ce groupe n'est autre que l'astéroïde (99942) Apophis qui aura effrayé les astronomes de part son risque important de collision avec la Terre en Décembre 2004. Aujourd'hui, il est considéré comme

²Cette table, basée sur la (Table 1) dans [Zellner et al., 1985], a été reprise par [Gradie et al., 1989]. Cependant, des coquilles non négligeables sont à noter (Table 1 dans [Gradie et al., 1989]), en particulier l'excentricité du groupe Phocaea $e \leq 0,10$, alors même que l'astéroïde (25) Phocaea de haute inclinaison $21^\circ.59$ a une orbite très excentrique $0,25$.

³Les figures 3.1(a) et 3.1(b) [Zellner et al., 1985] sont reproduites dans le cadre de ce manuscrit (version papier et électronique) sous licence RightsLink numéro 3012111355395.

⁴Toutes les inclinaisons ici sont données par rapport à l'écliptique.

⁵<http://neo.jpl.nasa.gov/neo/groups.html>

⁶Il fut découvert en 1932 par Karl Wilhelm Reinmuth (1892-1978). Il sera perdu et finalement retrouvé en 1973 [Bancelin, 2011].

⁷découvert en 1976 par Eleanor Francis Helin (1931-2009).

le meilleur cas d'école pour l'étude des astéroïdes à risque PHAs (Potentially Hazardous Asteroids).

- **Les Amors**, du nom de l'astéroïde (1221) Amor. Leurs orbites sont positionnées au-delà de celle de la Terre. Ils approchent l'orbite de la Terre sans pour autant la croiser. Cependant, certains d'entre eux croisent l'orbite de Mars. Pour ne citer qu'un seul membre de cette famille, je mentionnerai l'astéroïde (433) Eros⁸.
- **Les Atiras**, du nom de l'astéroïde (163693) Atira. Dernier groupe de NEA découvert, ces objets sont également connus sous le nom de IEOs (Inner Earth Objects). Ils se situent en-deçà de l'orbite terrestre (Table 3.2), et ils sont donc moins observables que les AAA (Apollo-Amor-Aten). Certains des Atiras croisent l'orbite de Vénus (cythérocroiseurs) ou encore de Mercure (herméocroiseurs) [Bancelin, 2011].

La figure 3.2⁹ montre le nombre d'astéroïdes pour chaque groupe dynamique constituant les NEAs.

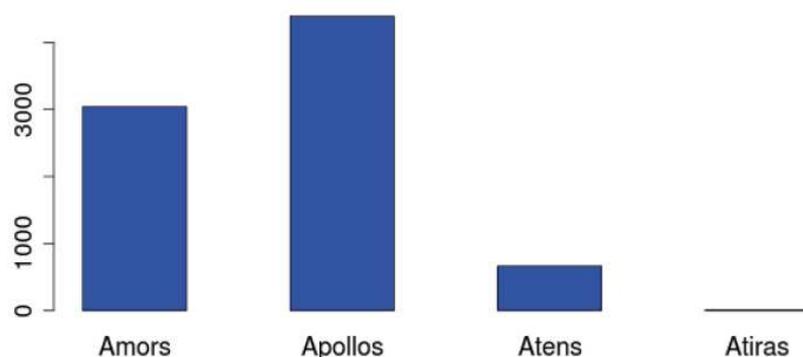


FIG. 3.2: Nombre d'astéroïdes dans les différents groupes des NEAs.

La figure 3.3¹⁰ montre l'évolution du nombre de NEA (évolution des découvertes) de janvier 1980 à juin 2012. Aujourd'hui, nous pouvons considérer que la population des NEAs avec une magnitude $H \leq 16$ est quasi-complète (192 objets dans NEODys¹¹), et que 50% de ceux avec une magnitude $H \leq 18$ ont été détectés [Valsecchi and Gronchi, 2011]. On remarquera d'ailleurs une saturation des découvertes des gros objets, et une croissance exponentielle du nombre de découvertes depuis la fin des années 1990. Ceci est probablement dû à la multiplication de grands programmes (surveys) d'observations : LINEAR (Lincoln Near-Earth Asteroid Research), LONEOS (Lowell Observatory Near-Earth Object Search), Spacewatch, CSS (Catalina Sky Surveys), Pan-STARRS (Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System), NEOWISE/WISE (Wide-Field Infrared Survey Explorer) ... La mission GAIA (prévue pour septembre 2013) devrait elle aussi être bénéfique.

⁸cible de la sonde NEAR-Shoemaker en février 2000 et qui s'est posée sur l'astéroïde le 12 février 2001 [Gaskell et al., 2010]. Cette mission permettra une meilleure connaissance des paramètres physiques, orbitaux et gravitationnels d'Eros [Konopliv et al., 2002].

⁹<http://neo.jpl.nasa.gov/stats/>

¹⁰<http://neo.jpl.nasa.gov/stats/>

¹¹<http://newton.dm.unipi.it/neodys2/index.php?pc=3.0>

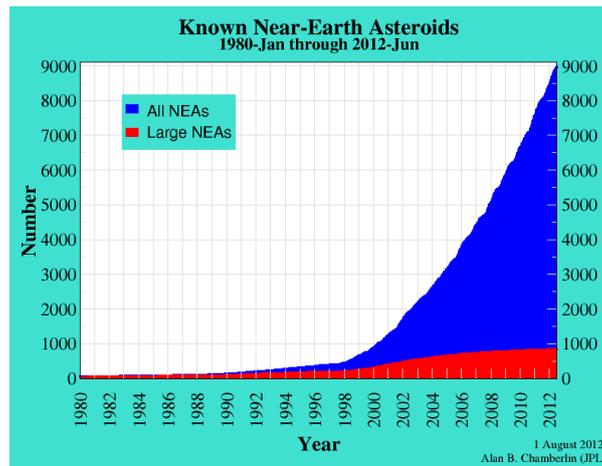


FIG. 3.3: Nombre de NEAs découverts par an, depuis 1980.

3.1.2 Les astéroïdes de la ceinture principale (MBAs)

Rappelons que le premier objet découvert a été Cérès en 1801 (cf. Sect. 1.2). Le nombre de découvertes ne cesse de croître depuis une vingtaine d’années (Fig. 1.7(a)). Nous remarquerons (Table 3.1) une augmentation considérable du nombre d’astéroïdes depuis [Zellner et al., 1985]. Les différents groupements (zones du Tableau 3.1) sont :

- **Les Hungarias** : du nom de l’astéroïde (434) Hungaria¹², premier astéroïde découvert dans cette zone définie en éléments osculateurs. Elle est délimitée par la population des Mars-Crossers, la lacune de Kirkwood correspondant à la résonance de moyen mouvement 4 :1 avec Jupiter et les résonances séculaires ν_5 and ν_{16} [Gradie et al., 1989] [Milani et al., 2010]. Cependant, [Lemaitre, 1994] identifiera pour la première fois la famille Hungaria (définie en terme d’éléments propres). Cette famille fera l’objet de plusieurs études [Milani et al., 2010], [McEachern et al., 2010]. La possibilité de l’existence d’une seconde famille dans cette zone, bien que difficile à identifier, a été abordée dans [Milani et al., 2010].
- **Les Flores** : du nom de l’astéroïde (8) Flora. Je reviendrai plus tard sur l’existence d’une famille dynamique dans cette zone.
- **La ceinture principale** : (I, IIa, IIb, IIIa, IIIb) (Table 3.1) : Ce groupement s’étend entre 2,30 au et 3,03 au. Je reviendrai plus en détail sur cette population tout au long des chapitres suivants.
- **La zone des Griquas** : du nom de l’astéroïde (1362) Griqua¹³. Ces astéroïdes sont en résonance de moyen mouvement 2 :1 avec Jupiter. Ils occupent une zone instable centrée autour de 3,3 ua, plus communément connue sous le nom de *Lacune de Hecuba*. Roig et ses collaborateurs [Roig et al., 2002] distinguent trois populations dans cette zone :
 - Les Zhongguos : stables sur tout l’âge du système solaire. Ils sont caractérisés par de faibles inclinaisons $i < 5^\circ$,
 - Les Griquas : stables sur 100 à 500 millions d’années,
 - Enfin, une population instable qui est très vite éjectée de la zone (moins de 100 millions d’années). Les intégrations numériques effectuées par [Brož et al., 2005] suggèrent que l’ef-

¹²découvert par Max Wolf (1863-1932) le 11 septembre 1898 (<http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?sstr=434;orb=1>)

¹³découvert le 31 juillet 1935 par Cyril Jackson (1903-1988) à Johannesburg

fet Yarkovsky (cf. Annexe C.2) joue un rôle majeur dans l'instabilité de ces astéroïdes (futurs comètes de la famille de Jupiter). Toutefois, l'origine des Zhongguos et des Griquas reste encore inexpliquée.

- **Groupe Cybele** : du nom de l'astéroïde (65) Cybele¹⁴. Il se situe dans la partie externe de la ceinture principale avec des demi-grands axes compris entre 3,27 au et 3,70 au (Table 3.1). L'un des membres les plus connus de ce groupe (après (65) Cybèle bien sûr) est l'astéroïde (87) Sylvia, le premier astéroïde possédant deux satellites à avoir été identifié¹⁵ [Marchis et al., 2005].
- **Groupe Hilda** : du nom de l'astéroïde (153) Hilda¹⁶. Ils sont en résonance de moyen mouvement 3:2 avec Jupiter (Fig. 3.1). Tout comme le groupe des Griquas, cette population réside dans une résonance de moyen mouvement d'ordre un avec Jupiter. Brož et Vokrouhlický [Brož and Vokrouhlický, 2008] et beaucoup d'autres auteurs se sont intéressés à ce genre de populations depuis quelques décennies maintenant. De par leur proximité de Jupiter et leur présence dans des résonances de moyen mouvement d'ordre un avec cette dernière, ces populations sont donc liées à l'évolution orbitale de Jupiter et par conséquent à celles des planètes géantes (Modèle de Nice, Sect. 1.4).
- **Les Troyens de Jupiter** : Le premier troyen, en libration autour du point de Lagrange L₄, (588) Achille, sera découvert à Heidelberg le 22 février 1906 par l'astronome allemand Max Wolf (1863-1932) (découvreur de (434) Hungaria). Aujourd'hui, on dénombre 4.030 "Troyens" de Jupiter (Table 3.1), appellation toutefois abusive car il faudrait parler de Grecs et de Troyens. En effet, le terme de *Grecs* est utilisé pour les astéroïdes en libration autour du point L₄ (groupe en tête), alors que le terme de Troyens est utilisé pour ceux en libration autour du point L₅ (groupe en queue). Les noms des astéroïdes appartenant à ces deux groupes ont été choisis de manière à correspondre aux noms de chaque membre des Grecs et Troyens ayant pris part à la bataille de Troie, d'après l'Illiade d'Homère. C'est en ce sens qu'un intru grec est également présent en L₅ parmi les troyens. Le modèle le plus probable pour expliquer l'existence d'une telle population est la capture du modèle de Nice lors de la migration planétaire [Morbidelli et al., 2005].
- **Les objets transneptuniens (TNOs)** : ces objets ne figuraient pas dans le tableau initial de [Zellner et al., 1985]. En effet, le premier objet transneptunien ((134340) Pluton mis à part¹⁷) (15760) 1992QB1 a été découvert en 1992 [Jewitt et al., 1992]. On dénombre aujourd'hui 1.252 TNOs¹⁸ (Table 3.1).

¹⁴découvert par l'astronome Allemand Ernst Wilhelm Leberecht Tempel (1821-1889), le 08 mars 1861 à l'Observatoire de Marseille. (<http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi#top>)

¹⁵Les deux satellites de Sylvia ont été nommés : I Romulus et II Rémus. Rhéa Sylvia, déesse du fleuve Tibre (dans la mythologie romaine), épouse de Tibérinus (dieu du fleuve Tibre) est la mère de Romulus et de Rémus

¹⁶découvert par l'astronome Autrichien Johann Palisa (1848-1925) le 02 novembre 1875 (<http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi#top>).

¹⁷La planète Pluton a été découverte le 18 février 1930, par l'astronome Américain Clyde William Tombaugh (1906-1997). Elle a été rétrogradée au rang de planète naine et le numéro (134340) lui a été attribué en 2006 (Sect. 1.3), après la découverte de la planète naine (136199) Eris en 2006.

¹⁸<http://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/TNOs.html>

3.2 Distributions des astéroïdes de la ceinture principale (MBAs)

Notre conception de ce qu'est la mécanique céleste a beaucoup évolué au travers des siècles. Comme cela a été merveilleusement bien expliqué dans [Tsiganis, 2005], la conception du système solaire comme système stable et déterministe a régné pendant plusieurs siècles. Les travaux de Lagrange ainsi que ceux de Laplace ont grandement contribué à cela. En effet, le développement analytique des solutions pour les mouvements des planètes dans le système solaire à l'ordre un en masses, inclinaisons, excentricités, donnait des mouvement quasi-périodiques.

Il faudra attendre les travaux de Jules Henri Poincaré (1854-1912) et ses "Méthodes nouvelles de la mécanique céleste (1896)" pour que cette vision soit petit à petit remise en cause. Depuis, et grâce à l'avènement du numérique, des développements à l'ordre supérieur ([Laskar, 1988] à [Laskar, 2012]) ont permis de démontrer la chaotité du système solaire. C'est ce que Tsiganis [Tsiganis, 2005] appelle "la nouvelle mécanique céleste". Dans le contexte de cette dernière, nous disposons de deux réservoirs¹⁹ de petits objets du système solaire : les objets transneptuniens (décrits brièvement plus haut) et la ceinture principale d'astéroïdes (constituant le plus gros des deux réservoirs). Ces réservoirs nous fournissent de larges populations d'objets sur lesquelles nous pouvons tester notre dynamique. Voilà une autre raison de s'intéresser aux astéroïdes, en plus de celles citées Sect. 1.5.

Le rôle de la *nouvelle mécanique céleste* d'après [Tsiganis, 2005], position qui est aussi la mienne au-delà de cette thèse, est de comprendre les distributions diverses et variées des populations constituant ces réservoirs. Nous aurons l'occasion de le voir dans la suite, ces populations sont très imprégnées des effets à long terme dus aux perturbations des planètes, et en particulier des planètes géantes.

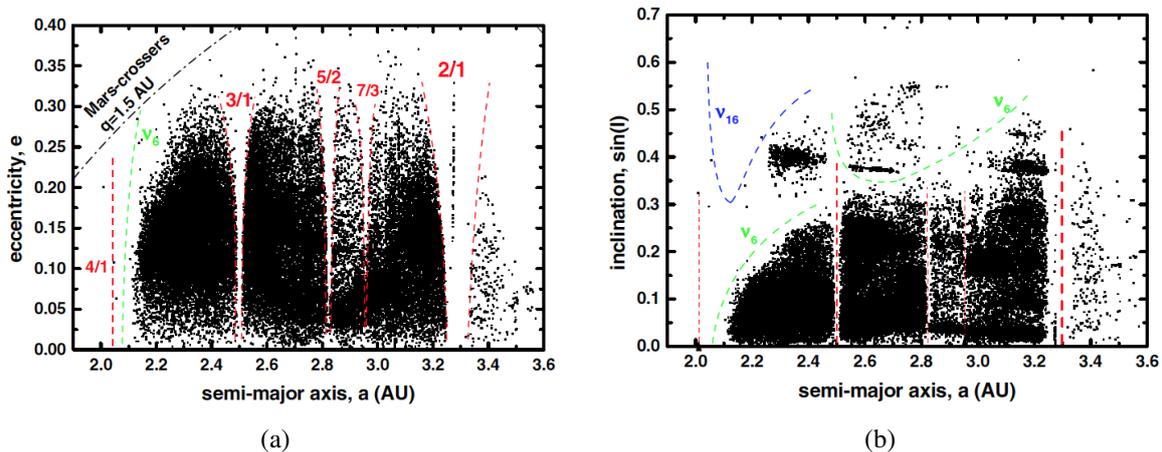


FIG. 3.4: Distribution des astéroïdes de la ceinture principale [Tsiganis, 2005].

La figure 3.4, issue de [Tsiganis, 2005]²⁰, montre deux représentations classiques de la ceinture d'astéroïdes. La figure 3.4(a) montre la distribution en demi-grand axe (a) et excentricité e ,

¹⁹je me permets de reprendre le terme utilisé par [Tsiganis, 2005]

²⁰reprise avec l'accord du Dr. Kleomenis Tsiganis (email du 28 septembre 2012). Figure provenant initialement de la base de données AstDyS.

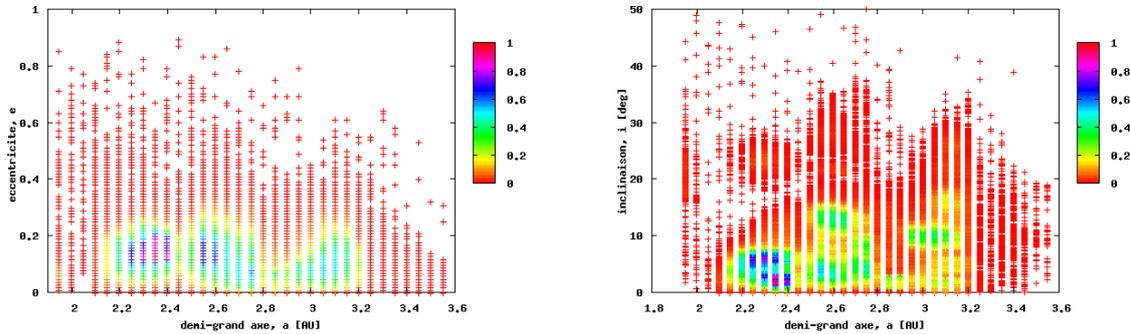
alors que la figure 3.4(b) montre la distribution en demi-grand axe a et inclinaison i par rapport à l'écliptique²¹.

Sont indiquées en rouge les lacunes de Kirkwood (qui retranscrivent des résonances de moyen mouvement (MMR) avec Jupiter), et en vert la résonance séculaire d'ordre 1 avec Saturne $\nu_6 = g - g_6$, g étant la fréquence de précession du périhélie de l'astéroïde, g_6 la fréquence de précession du périhélie de Saturne, et $\nu_{16} = s - s_6$ la différence entre les fréquences de précession des nœuds.

Ici, je traiterai uniquement les astéroïdes numérotés de la ceinture principale²², à savoir des populations I, IIa, IIb, IIIa et IIIb de la Table 3.1.

Distribution classiques. Les figures 3.5(a) et 3.5(b) correspondent respectivement aux figures 3.4(a) et 3.4(b), avec la composante densité de distribution en plus. En effet, je m'intéresse non seulement à la distribution des astéroïdes dans la ceinture principale, mais aussi à la densité de cette distribution.

Il est également intéressant de comparer les figures 3.5(a) et 3.1(a) ; on remarquera que les zones noirs (Fig. 3.1(a)) correspondent aux zones de maximum de densité (Fig. 3.5(a)) et correspondent aux zones : Nysa, Koronis, Eos et Thémis définies dans [Zellner et al., 1985].



(a) Dans l'espace (a,e) en éléments osculateurs.

(b) Distribution Nautilus en éléments osculateurs.

FIG. 3.5: Densité de distribution en éléments osculateurs, pour 333.841 astéroïdes numérotés de la ceinture principale.

De même pour le Nautilus (Fig. 3.5(b)), les zones de maximum de densité correspondent aux zones en noir (Fig. 3.1(b)). Je reviendrai sur ces zones de fortes concentrations dans les prochains paragraphes.

Autres distributions. Je m'intéresse en particulier à un autre type de distribution, distribution en matière de plan orbitaux (i, Ω) (inclinaison, longitude du nœud ascendant) qui suscite

²¹J'appellerai les distributions en demi-grand axe a et inclinaison i , *Le Nautilus*.

²²Les résultats sont identiques si l'on considère aussi les astéroïdes non-numérotés.

habituellement beaucoup moins d'intérêt que les distributions classiques (Fig. 3.4). La figure 3.6 montre cette distribution pour tous les astéroïdes numérotés ayant une inclinaison inférieure à 20° .

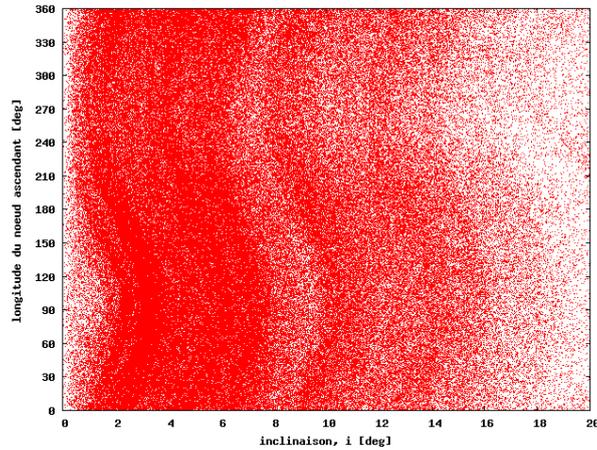


FIG. 3.6: Distribution en matière de plans orbitaux (i, Ω) .

Dans le reste de ce chapitre, je m'efforcerai d'expliquer cette distribution particulière qui laisse clairement apparaître des formes sinusoïdales, qui pour chaque valeur de i laisserait croire à une symétrie autour du point $(i, 180)$.

3.3 Distribution des astéroïdes en terme de plans orbitaux

Depuis leur découverte, la distribution des astéroïdes dans l'espace suscite l'intérêt et la curiosité des astronomes et mathématiciens. Ici je m'intéresse à une distribution peu commune, celle donnée en terme de plan orbitaux (dans l'espace (i, Ω)) Fig. 3.6. Dans les paragraphes suivants, je justifierai cette distribution (Fig. 3.6) ainsi que la densité de distribution correspondante (Fig. 3.8).

3.3.1 Justifications dynamiques

Les deux premières questions évidentes que nous devons nous poser sont les suivantes :

- (i) Cette distribution est-elle due à un biais observationnel ?
- (ii) La région de concentration maximale correspond-t-elle à un groupement dynamique particulier ?

La réponse à la question (i) est *non*. En effet, cette distribution reste inchangée quelque soit la taille de la population considérée. J'ai conduit plusieurs tests en me limitant aux premiers 4.000, 6.000, 10.000 astéroïdes numérotés ; ainsi que sur les populations actuelles en considérant uniquement les astéroïdes numérotés (Fig. 3.6 et 3.8), puis en incluant les non numérotés.

De même, la réponse à la question (ii) est *non*. En isolant les astéroïdes correspondant à la région de concentration maximale, qui se trouve au milieu du croissant ou de l'arc bleuâtre

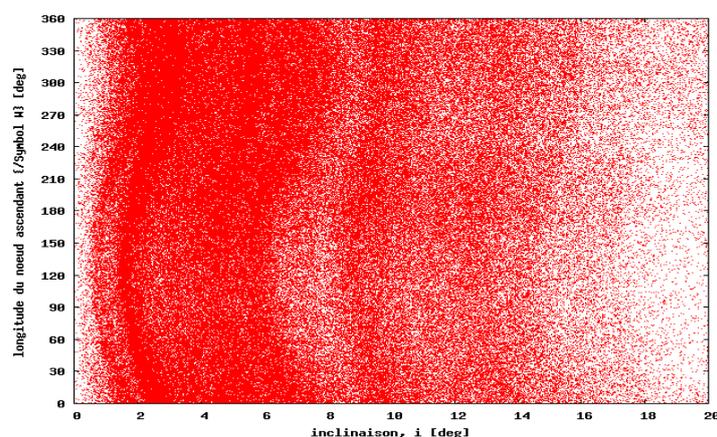


FIG. 3.7: Distribution en terme de plans orbitaux, dans l'espace des éléments moyens (i, Ω).

(Fig. 3.8), et en scrutant leur distribution en demi-grand axe et excentricité, il n'en est rien ressorti de concluant. Cet échantillon était réparti de manière complètement aléatoire, même si la présence de l'astéroïde (44) Nysa dans cette région aurait pu laisser croire le contraire avant d'avoir regardé les distributions.

Les distributions (Fig. 3.6 et 3.8) étant données en éléments osculateurs (à une certaine époque, en l'occurrence ici MJD 56200.000000²³), une autre question s'impose : cette distribution serait-elle complètement fortuite ?

Je présente Fig. 3.7 cette même distribution en éléments moyens. Ici encore et malgré un décalage de 180° en Ω , le comportement sinusoïdal reste bien présent.

Nous pouvons donc conclure que cette distribution en plan orbitaux (par rapport à l'écliptique) résulte de la dynamique du système. J'ai cherché l'explication dans la théorie séculaire et, en particulier, dans l'effet de Jupiter. Pour ce faire, j'ai considéré une approche simplifiée de la théorie séculaire des mouvements des planètes géantes, en particulier Jupiter, et la perturbation induite sur les petits corps de la ceinture principale. Dans le reste de ce chapitre, je m'efforcerai à démontrer que cet effet suffit largement à expliquer les distributions observées (Fig 3.8).

L'approche analytique suivie est celle de [Murray and Dermott, 1999, chapitre 7] et les résultats semi-analytiques obtenus seront confrontés aux résultats d'intégrations numériques.

Avant d'aborder l'aspect dynamique, conséquence des effets séculaires des grosses planètes (Jupiter et Saturne), je prendrai le temps de dresser l'état des lieux des études sur cette distribution très peu étudiée.

3.3.2 État de l'art

Mes recherches bibliographiques sur le sujet ne m'ont menées nulle part. Après plusieurs mois, je suis cependant tombée sur la page web de l'astronome Tchèque Petr Scheirich²⁴, qui se posait en 2005 la question de l'origine de cette distribution.

²³correspondant au 30 septembre 2012

²⁴<http://sajri.astronomy.cz/asteroidgroups/groups.htm>

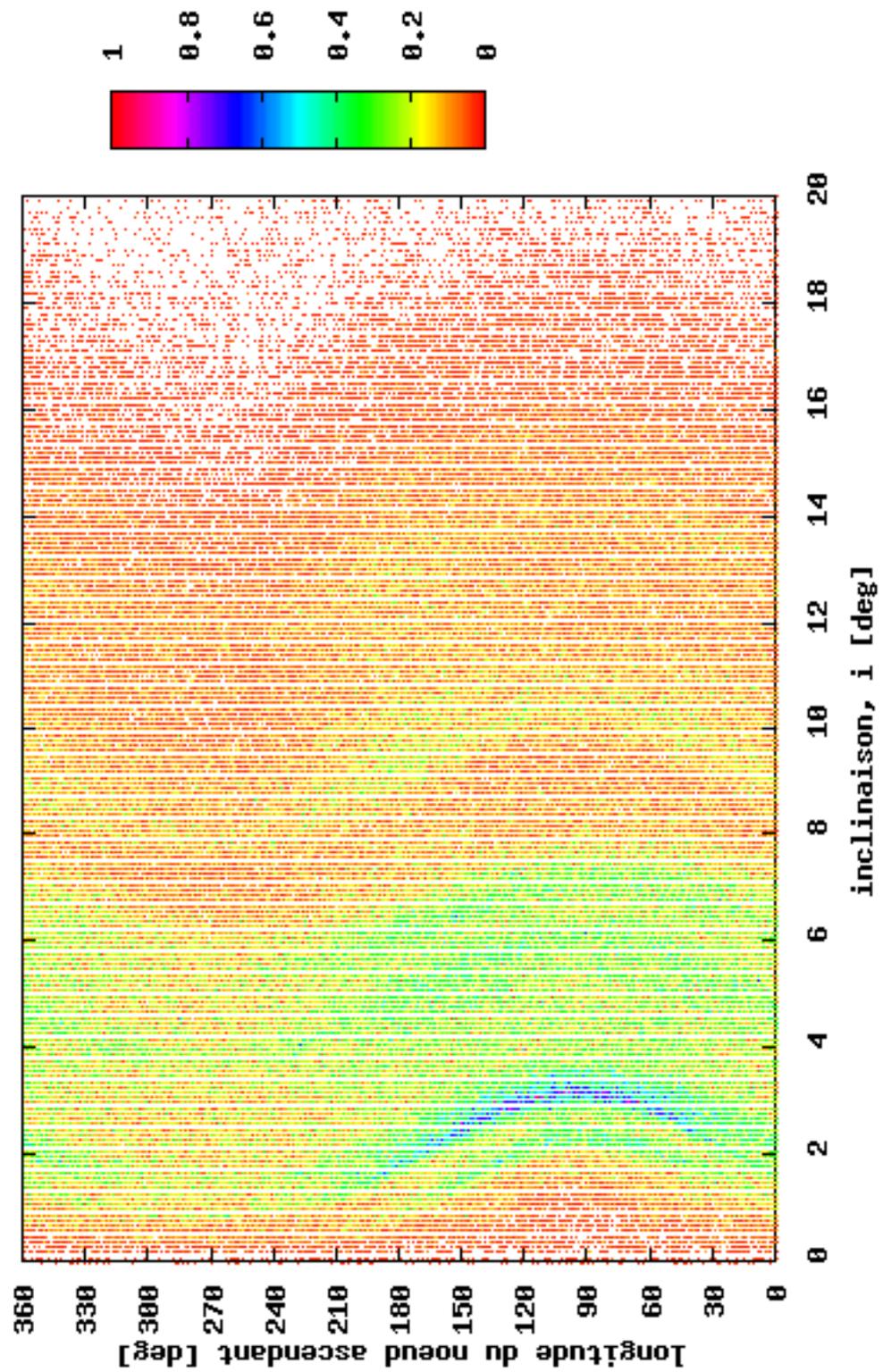


FIG. 3.8: Densité de distribution en matière de plans orbitaux (i, Ω).

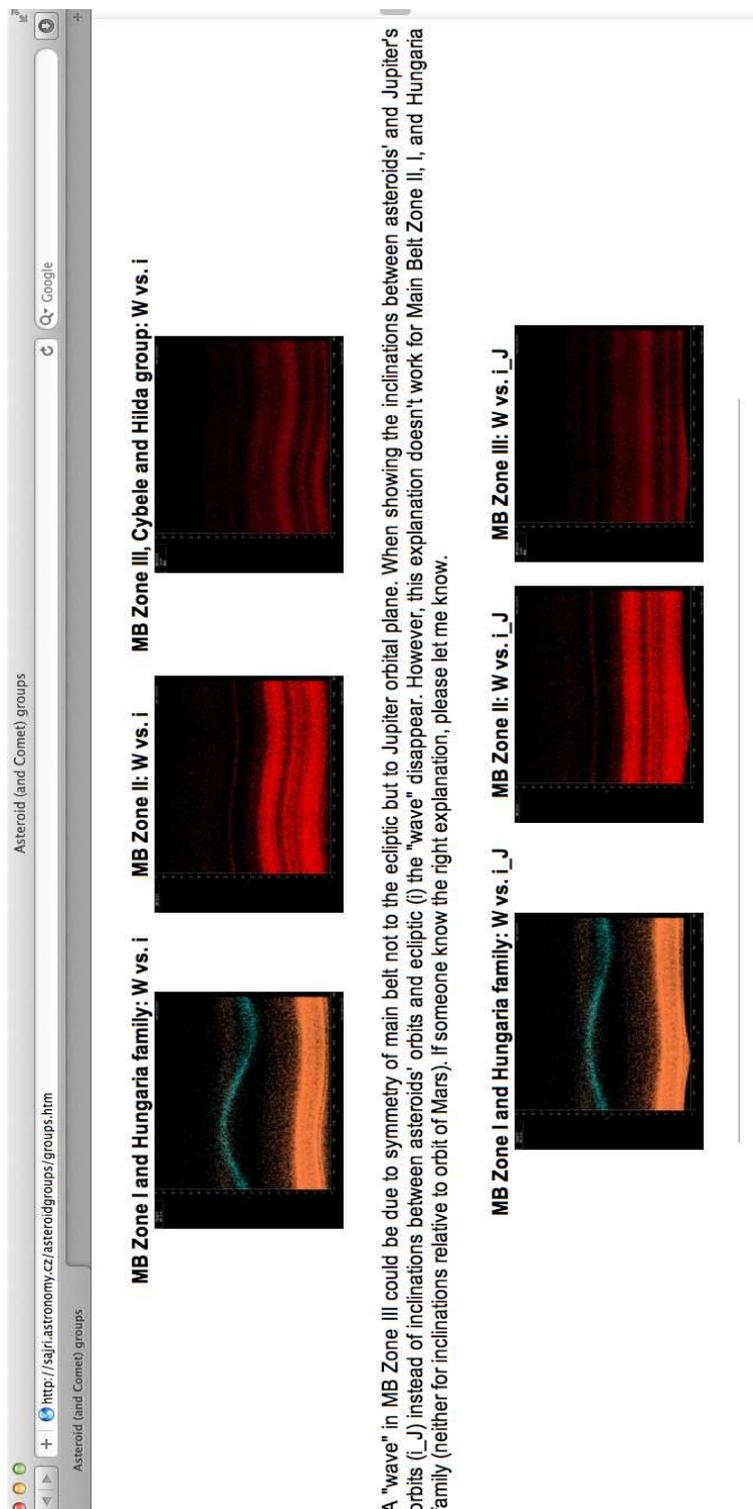


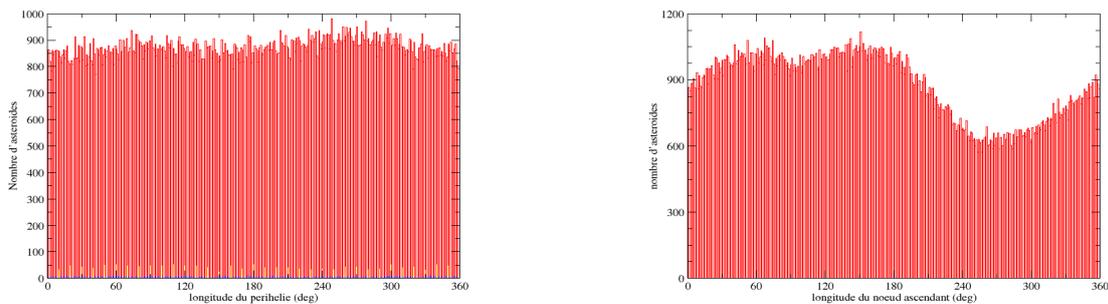
FIG. 3.9: Distribution en plans orbitaux (Ω, i) pour les astéroïdes du groupe Hungaria (en bleu) ainsi que les astéroïdes de la ceinture principale (Capture d'écran de la Page web de Petr Scheirich).

Je présente figure 3.9 une capture d'écran de cette page web²⁵. La distribution en (Ω, i) est donnée pour les zones MBI, MBII, MBIII de la ceinture principale ainsi que pour le groupe des Hungarias. La représentation est donnée par rapport à l'écliptique-équinoxe J2000.0 dans la colonne de gauche et par rapport au plan orbital de Jupiter dans la colonne de droite, l'origine des nœuds restant inchangée dans les deux cas (point vernal γ).

Petr Scheirich [Scheirich, 2005] fait remarquer l'apparition de "vagues" lorsque cette distribution est donnée par rapport à l'écliptique ; "vagues" qui ont tendance à s'aplatir lorsqu'on se place par rapport au plan de Jupiter (Fig .3.9).

Malgré mon acharnement dans mes recherches bibliographiques, il aura fallu attendre juin 2012 pour trouver une référence qui traite indirectement du sujet.

En effet, [Michkovitch, 1947] aborde la question de la répartition des nœuds et périhélies des planètes. Il commence par faire remarquer que dès 1854, D'Arrest montre sur un petit échantillon (une quinzaine d'astéroïdes) la répartition non-uniforme des nœuds et des périhélies le long de l'écliptique. Newcomb reprend cela en 1860 et l'explique par les perturbations séculaires de Jupiter. En 1871, il réitère son étude sur un échantillon plus grand (105 petits corps) et en arrive à la même conclusion. Depuis et jusqu'en 1947 (à ma connaissance) [Michkovitch, 1947], cette explication était vérifiée tous les cinq ans sur un plus gros échantillon. Toutefois, certains suggéreront que c'est la combinaison des effets séculaires de Jupiter et Saturne qui sont à l'origine de cette distribution des nœuds ascendants, tandis que d'autres comme J. Kleiber, 1886 et H.C. Plummer, 1916 s'en remettent aux *lois de hasard*. Cependant, en ce qui concerne la distribution des périhélies, toutes les études jusqu'à la fin des années 1930 arrivaient à la même conclusion que Newcomb.



(a) Histogramme de la distribution des périhélies

(b) Histogramme de la distribution des nœuds

FIG. 3.10: Histogramme de la distribution des nœuds et périhélies pour un échantillon de 312.710 astéroïdes numérotés, entre 2,5 au et 3,7 au et avec une inclinaison inférieure à 20°.

L'étude menée dans [Michkovitch, 1947] sur un échantillon de 1.500 astéroïdes arrive à la conclusion qu'aucune accumulation n'est observée dans la distribution des nœuds. Une accumulation autour du périhélie de Jupiter est quant-à elle observée pour la distribution des périhélies.

²⁵Avec l'autorisation de Petr Scheirich

Nous constatons le contraire aujourd'hui (Fig. 3.10) sur un échantillon de 312.710 astéroïdes. Nous retrouvons bien la fameuse "vague".

3.3.3 Distribution par rapport à d'autres plans de référence

J'ai regardé cette distribution dans le plan (i, Ω) (éléments osculateurs et moyens) (Sect. 3.3.1) par rapport à l'écliptique-équinoxe J2000.0, mais aussi dans d'autres plans, tout comme [Scheirich, 2005].

Petr Scheirich [Scheirich, 2005] avait remarqué la disparition de la vague, du moins pour les zones MB-II et MB-III de la ceinture principale (Fig. 3.9), en considérant les inclinaisons par rapport au plan de Jupiter et en gardant comme origine des nœuds le point vernal.

Je présente figures 3.11 - 3.12 la densité de distribution (i, Ω) :

- Fig. 3.11 : l'inclinaison i est donnée par rapport au plan orbital de Jupiter, de même que l'origine des nœuds est le nœud ascendant de Jupiter dans l'écliptique-équinoxe J2000.0. On remarquera la disparition graduelle des "vagues".

- Fig. 3.12(a) (respectivement 3.12(b)) : l'inclinaison i est donnée par rapport au plan invariable (IP, cf. chapitre 2) (respectivement, au plan orbital de Saturne), de même que l'origine des nœuds est le nœud ascendant de l'IP (respectivement, Saturne) dans l'écliptique-équinoxe J2000.0. On remarquera ici la présence de "vagues", toutefois plus étalées que celles dans la section 3.3.1.

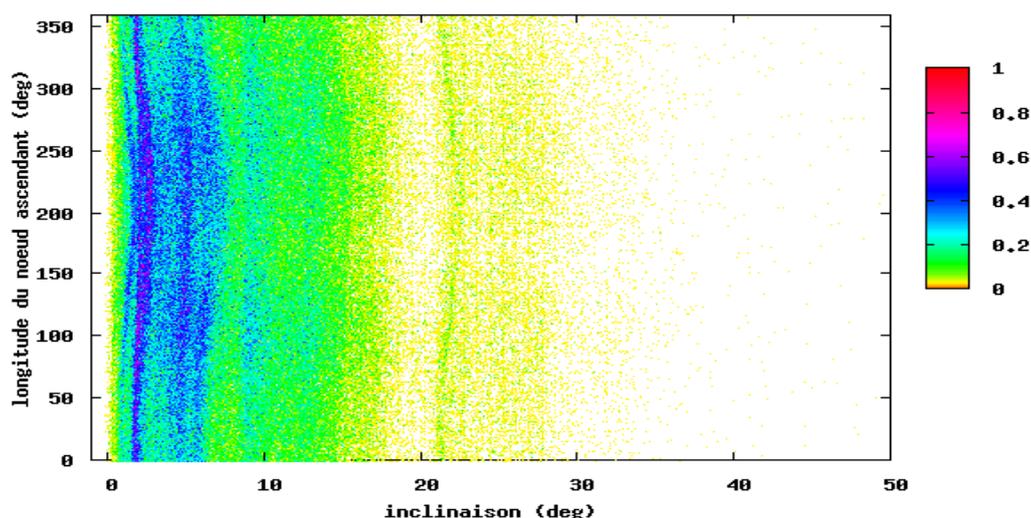
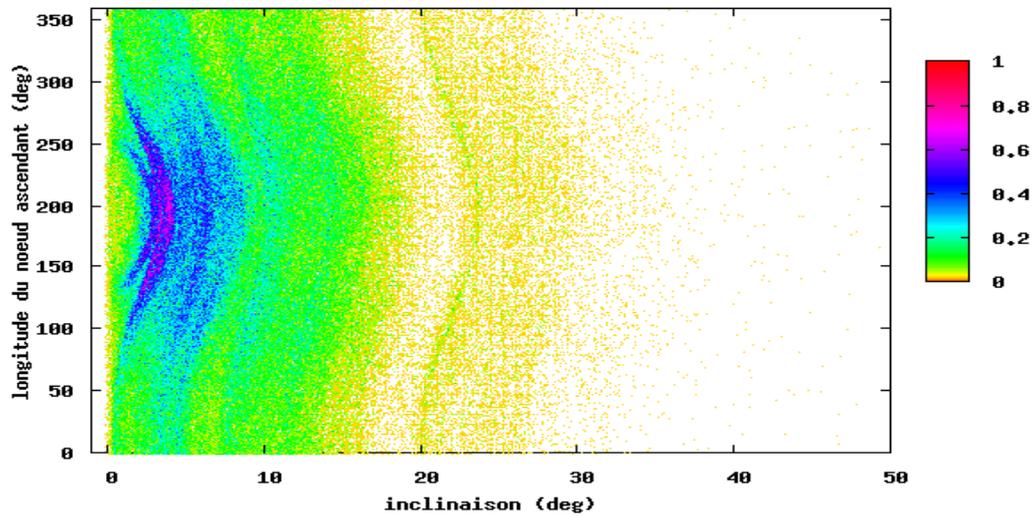
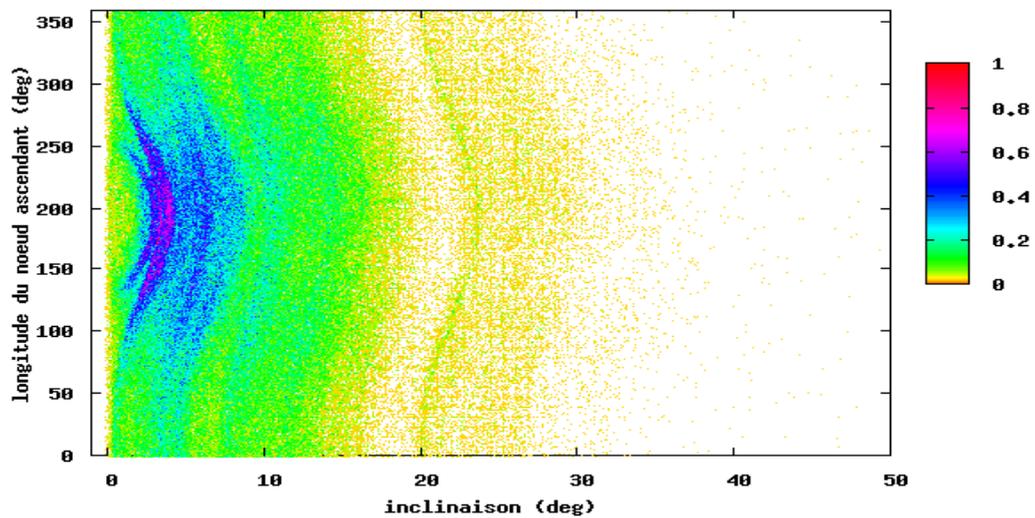


FIG. 3.11: Densité de distribution par rapport au plan de Jupiter. L'origine des nœuds est le nœud de Jupiter dans l'écliptique-équinoxe J2000.0.



(a) Densité de distribution par rapport à l'IP. L'origine des nœuds est le nœud de l'IP dans l'écliptique-équinoxe J2000.0.



(b) Densité de distribution par rapport au plan de Saturne. L'origine des nœuds est le nœud de Saturne dans l'écliptique-équinoxe J2000.0.

FIG. 3.12: Densité de distribution pour 444.251 astéroïdes (numérotés et non-numérotés) de la ceinture principale.

3.4 Perturbations séculaires entre deux planètes

J'applique ici la théorie séculaire simplifiée développée dans [Murray and Dermott, 1999, Sect. 7.2], les notations utilisées seront également identiques.

Notons m_1 et m_2 les masses respectives de Jupiter et Saturne, et m_c la masse du corps central (masse du Soleil). Dans tout ce qui suit, l'indice 1 sera utilisé pour Jupiter et l'indice 2 pour Saturne. Les paramètres orbitaux des planètes à l'époque, ainsi que leurs masses respectives sont données Table 3.3.

	Jupiter	Saturne
$\frac{m_i}{m_c}$	1	1
a (UA)	5.208168	9.527521
n ($^{\circ}\text{yr}^{-1}$)	30.290890	12.242486
e	0.049573	0.055202
i ($^{\circ}$)	1.303811	2.487683
Ω ($^{\circ}$)	100.513613	113.590929
ω ($^{\circ}$)	274.791257	337.798035
M ($^{\circ}$)	45.887030	114.364646

TAB. 3.3: Paramètres de Jupiter et Saturne.

Ecrivons les mouvements séculaires inclinés de Jupiter et Saturne perturbés l'un par l'autre. Considérons le mouvement de ces deux planètes sous leurs influences mutuelles et sous l'effet gravitationnel du corps central (Soleil). Notons \mathcal{R}_1 et \mathcal{R}_2 les fonctions perturbatrices sur les orbites respectives de Jupiter et Saturne. Pour tout corps i, j ($i, j \in \{1, 2\}$ avec $i \neq j$), la fonction perturbatrice s'écrit :

$$\mathcal{R}_i = \frac{Gm_j}{a_j} \mathcal{R}_D^{(sec)} \quad (3.1)$$

avec $\mathcal{R}_D^{(sec)}$ la fonction perturbatrice séculaire. En considérant le développement de cette fonction au premier ordre en masses et jusqu'au deuxième ordre en inclinaisons et excentricités (Eq. 7.6 et 7.7 dans [Murray and Dermott, 1999]) ; cette fonction perturbatrice, en l'absence de commensurabilité entre les masses, s'écrit pour Jupiter :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathcal{R}_1 = n_1^2 a_1^2 \frac{m_2}{m_1 + m_c} \left[\frac{1}{8} \alpha_{12}^2 b_{3/2}^{(1)} e_1^2 - \frac{1}{8} \alpha_{12}^2 b_{3/2}^{(1)} I_1^2 \right. \\ \left. - \frac{1}{4} \alpha_{12}^2 b_{3/2}^{(2)} e_1 e_2 \cos(\omega_1 - \omega_2) + \frac{1}{4} \alpha_{12}^2 b_{3/2}^{(1)} I_1 I_2 \cos(\Omega_1 - \Omega_2) \right] \end{array} \right. \quad (3.2)$$

pour Saturne :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathcal{R}_2 = n_2^2 a_2^2 \frac{m_1}{m_2 + m_c} \left[\frac{1}{8} \alpha_{12} b_{3/2}^{(1)} e_2^2 - \frac{1}{8} \alpha_{12} b_{3/2}^{(1)} I_2^2 \right. \\ \left. - \frac{1}{4} \alpha_{12} b_{3/2}^{(2)} e_1 e_2 \cos(\omega_1 - \omega_2) + \frac{1}{4} \alpha_{12} b_{3/2}^{(1)} I_1 I_2 \cos(\Omega_1 - \Omega_2) \right] \end{array} \right. \quad (3.3)$$

les coefficients α_{ij} ainsi que les coefficients de Laplace $b_{3/2}^{(1)}$, $b_{3/2}^{(2)}$ seront définis ultérieurement. Ici, les angles I_j ont été supposés petits de manière à ce que : $\sin I_j = I_j$.

En effet, il n'est pas nécessaire d'aller plus loin dans le développement pour expliquer les distributions observées (Figures 3.6 et 3.8).

Les équations 3.2 et 3.3 peuvent être écrites de la manière suivante :

$$\mathcal{R}_j = n_j a_j^2 \left[\frac{1}{2} A_{jj} e_j^2 + A_{jk} e_1 e_2 \cos(\omega_1 - \omega_2) + \frac{1}{2} B_{jj} I_{jj}^2 + B_{jk} I_1 I_2 \cos(\Omega_1 - \Omega_2) \right] \quad (3.4)$$

Les matrices A et B sont données par :

$$A_{jj} = +n_j \frac{1}{4} \frac{m_k}{m_c + m_j} \alpha_{12} \bar{\alpha}_{12} b_{3/2}^{(1)}(\alpha_{12}), \quad (3.5)$$

$$A_{jk} = -n_j \frac{1}{4} \frac{m_k}{m_c + m_j} \alpha_{12} \bar{\alpha}_{12} b_{3/2}^{(2)}(\alpha_{12}), \quad (3.6)$$

$$B_{jj} = -n_j \frac{1}{4} \frac{m_k}{m_c + m_j} \alpha_{12} \bar{\alpha}_{12} b_{3/2}^{(1)}(\alpha_{12}), \quad (3.7)$$

$$B_{jk} = +n_j \frac{1}{4} \frac{m_k}{m_c + m_j} \alpha_{12} \bar{\alpha}_{12} b_{3/2}^{(1)}(\alpha_{12}), \quad (3.8)$$

Il est important de noter que les matrices A et B telles qu'elles sont définies (Eqs. 3.5 à 3.7) ne dépendent que des masses des corps et du demi-axe (fixe) à travers les coefficients de Laplace (cf. explications ultérieures).

Pour le corps j , les composantes du vecteur excentricité s'écrivent :

$$h_j = e_j \sin \omega_j, \quad k_j = e_j \cos \omega_j \quad (3.9)$$

De même, les composantes du vecteur inclinaison sont données par :

$$p_j = I_j \sin \Omega_j, \quad q_j = I_j \cos \Omega_j \quad (3.10)$$

L'équation 3.4 peut s'écrire :

$$\begin{aligned} \mathcal{R}_j = n_j a_j^2 & \left[\frac{1}{2} A_{jj} (h_j^2 + k_j^2) + A_{ji} (h_j h_i + k_j k_i) \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} B_{jj} (p_j^2 + q_j^2) + B_{ji} (p_j p_i + q_j q_i) \right] \end{aligned} \quad (3.11)$$

L'équation 3.9 s'écrit également sous la forme suivante [Murray and Dermott, 1999], [Brouwer and Clemence, Dec 1961] :

$$h_j = \sum_{i=1}^2 e_{ji} \sin(g_i t + \beta_i) \quad ; \quad k_j = \sum_{i=1}^2 e_{ji} \cos(g_i t + \beta_i) \quad (3.12)$$

De même, les composantes du vecteur inclinaison (Eq. 3.10) sont données par :

$$p_j = \sum_{i=1}^2 I_{ji} \sin(f_i t + \gamma_i) \quad ; \quad q_j = \sum_{i=1}^2 I_{ji} \cos(f_i t + \gamma_i) \quad (3.13)$$

Les fréquences g_i, f_i sont les valeurs propres respectives des matrices A et B.

Définition des notions nécessaires

Les coefficients $\alpha_j, \bar{\alpha}_j$ sont définis comme suit :

$$\alpha_{jk} = \begin{cases} a_j/a_k & \text{si } a_j < a_k \\ a_k/a_j & \text{si } a_j > a_k \end{cases} \quad (3.14)$$

$$\bar{\alpha}_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{si } a_j < a_k \\ a_k/a_j & \text{si } a_j > a_k \end{cases} \quad (3.15)$$

Nous définissons également les coefficients de Laplace :

$$\frac{1}{2}b_s^{(j)}(\alpha) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\cos(j\psi)d\psi}{(1 - 2\alpha \cos \psi + \alpha^2)^s} \quad (3.16)$$

Propriétés 3.4.1. Quelques propriétés des coefficients de Laplace [Murray and Dermott, 1999, Chapitre 6] :

$$\bar{\alpha}_j = \begin{cases} b_s^{(-j)} & = b_s^{(j)} \\ \mathcal{D}^n b_s^{(j)} & = s(b_{s+1}^{(j-1)} - 2\alpha b_{s+1}^{(j)} + b_{s+1}^{(j+1)}) \\ \mathcal{D}^n b_s^{(j)} & = s(\mathcal{D}^{n-1} b_{s+1}^{(j-1)} - 2\alpha \mathcal{D}^{n-1} b_{s+1}^{(j)} + \mathcal{D}^{n-1} b_{s+1}^{(j+1)} - 2(n-1)\mathcal{D}^{n-2} b_{s+1}^{(j)}) \end{cases} \quad (3.17)$$

où l'opérateur $\mathcal{D} \equiv \frac{d}{d\alpha}$.

En utilisant les notations de [D'Eliseo, 1989] et la propriété de symétrie, l'équation 3.16 s'écrit :

$$\left[\frac{n|h}{s} \right] = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi \frac{\cos(j\psi)(\cos \psi - \alpha)^h d\psi}{(1 - 2\alpha \cos \psi + \alpha^2)^s} \quad (3.18)$$

où $n, h, 2s \in \mathbb{N}$.

En différenciant l'équation 3.18 par rapport à α , et en utilisant les notations de [D'Eliseo, 1989], on obtient :

$$\frac{d}{d\alpha} \left[\frac{n|h}{s} \right] = 2s \left[\frac{n|h+1}{s+1} \right] - h \left[\frac{n|h-1}{s} \right] \quad (3.19)$$

Par exemple :

$$\begin{cases} b_s^{(n)} & = \left[\frac{n|0}{s} \right] \\ \frac{db_s^{(j)}}{d\alpha} & = 2s \frac{n|1}{s+1} \\ \frac{d^2 b_s^{(n)}}{d\alpha^2} & = 4s(s+1) \left[\frac{n|2}{s+2} \right] - 2s \left[\frac{n|0}{s+1} \right] \end{cases} \quad (3.20)$$

Le prochain théorème [D'Eliseo, 1989] se démontre facilement par récurrence.

Théorème 3.4.1. $\forall k \in \mathbb{N}^*$, on peut écrire :

$$\frac{d^k b_s^{(n)}}{d\alpha^k} = \sum_{h=0}^{\lfloor k/2 \rfloor} (-1)^h 2^{k-2h} \frac{k!}{h!(k-2h)!} (s)_{k-h} \left[\frac{n|k+1-2h}{s+k-h} \right] \quad (3.21)$$

avec $[k/2]$ la partie entière de $k/2$, et $(s)_k = s(s+1)(s+2)\dots(s+k-1)$ avec $(s)_0 = 1$.

Les méthodes données et démontrées par [D'Eliseo, 1989], [D'Eliseo, 2007] sont d'un grand intérêt pour le calcul numérique des coefficients de Laplace et de leurs dérivées. Elles nous permettent d'exprimer $D^k b_s^n$ comme fonction linéaire $D^{k'} b_s^n$, avec $k' = 0, \dots, k-1$.

Développement en série analytique

$$b_s^{(j)}(\alpha) = 2 \cdot \frac{s(s+1)\dots(s+j-1)}{j!} \alpha^j \times \left[1 + \frac{s(s+j)}{1(j+1)} \alpha^2 + \frac{s(s+1)(s+j)(s+j+1)}{1 \cdot 2 \cdot (j+1) \cdot (j+2)} \alpha^4 + \dots \right] \quad (3.22)$$

J'utiliserai le développement Eq. 3.22 (Eq. 6.68 dans [Murray and Dermott, 1999]) pour le calcul des coefficients de Laplace. Ces séries sont convergentes pour tout $\alpha < 1$.

3.4.1 Mouvement séculaire de Jupiter et Saturne

Dans le cas du mouvement séculaire de Jupiter et Saturne, nous avons à l'époque : $\alpha = 0.54664461$ et les coefficients de Laplace suivant : $b_{3/2}^{(1)} = 2.95917905$, $b_{3/2}^{(2)} = 1.95280749$.

Pour les matrices A (Eqs. 3.5, 3.6) et B (Eqs. 3.7, 3.8), on obtient :

$$A = \begin{pmatrix} 0.001912 & -0.001262 \\ -0.003118 & 0.004725 \end{pmatrix} \text{ } ^\circ y^{-1}, \quad (3.23)$$

$$B = \begin{pmatrix} -0.001912 & 0.001912 \\ 0.004725 & -0.004725 \end{pmatrix} \text{ } ^\circ y^{-1}, \quad (3.24)$$

Les valeurs propres de la matrice B (Eq. 3.24) qui correspondent aux fréquences de précession des nœuds, sont :

$f_1 = 0 \text{ } ^\circ yr^{-1}$ ²⁶ ; $f_2 = -8.608693 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ yr^{-1}$. Les vecteurs propres associés définis à une constante près sont notés :

$$\begin{pmatrix} \tilde{I}_{11} \\ \tilde{I}_{21} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.000000 \\ 1.000000 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \tilde{I}_{12} \\ \tilde{I}_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.000000 \\ 4.47093 \end{pmatrix} \quad (3.25)$$

De même, les valeurs propres de la matrice A (Eq. 3.23) qui correspondent aux fréquences de précession du périhélie, sont :

$g_1 = 0.88701 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ yr^{-1}$; $g_2 = 5.75020 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ yr^{-1}$. Les vecteurs propres associés définis à une constante près sont notés :

$$\begin{pmatrix} \tilde{e}_{11} \\ \tilde{e}_{21} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.000000 \\ 0.812432 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \tilde{e}_{12} \\ \tilde{e}_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.000000 \\ -3.041405 \end{pmatrix} \quad (3.26)$$

²⁶ $f_1 = 0$ est une racine évidente du polynôme caractéristique. Historiquement, et à ma connaissance, la valeur de fréquence de précession nulle du nœud a été assignée à Jupiter par [Bretagnon, 1974]. Elle est communément notée $s_5 = 0$.

Les vecteurs propres (Eqs. 3.25, 3.26) sont donnés à des constantes multiplicatives près. On notera ces constantes S_i, T_i avec $i \in \{1, 2\}$. À partir des conditions initiales données plus haut on pourra donc déterminer les vecteurs propres des matrices A et B pour notre système Soleil-Jupiter-Saturne. On notera e_{ij}, I_{ij} les vecteurs propres respectifs des matrices de A et B. Ils s'écrivent :

$$e_{ij} = S_j \tilde{e}_{ij} \quad , \quad I_{ij} = T_j \tilde{I}_{ij} \quad (3.27)$$

En remplaçant dans les équations 3.12, 3.13, on obtient pour les composantes du vecteur excentricité :

$$h_j = \sum_{i=1}^2 S_i \tilde{e}_{ji} \sin(g_i t + \beta_i) \quad ; \quad k_j = \sum_{i=1}^2 S_i \tilde{e}_{ji} \cos(g_i t + \beta_i) \quad (3.28)$$

de même, les composantes du vecteur inclinaison (Eq. 3.10) sont données par :

$$p_j = \sum_{i=1}^2 T_i \tilde{I}_{ji} \sin(f_i t + \gamma_i) \quad ; \quad q_j = \sum_{i=1}^2 T_i \tilde{I}_{ji} \cos(f_i t + \gamma_i) \quad (3.29)$$

Les conditions initiales (Table 3.3) donnent pour $t = 0$:

- le vecteur excentricité de Jupiter : $h_1 = 0.004140$; $k_1 = -0.049399$
- le vecteur inclinaison de Jupiter : $p_1 = -0.004152$; $q_1 = 0.022374$ (en radians)
- le vecteur excentricité de Saturne : $h_2 = 0.043943$; $k_2 = -0.017935$
- le vecteur inclinaison de Saturne : $p_2 = -0.009127$; $q_2 = 0.020899$ (en radians)

En évaluant l'équation 3.29 à $t = 0$, on obtient :

$T_1 = 0.0285251$; $T_2 = 0.0155673$; $\gamma_1 = 163^\circ.79189$; $\gamma_2 = 142^\circ.790467$, ce qui donne :

$$\begin{pmatrix} I_{11} \\ I_{21} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.0285251 \\ 0.0285251 \end{pmatrix} \quad , \quad \begin{pmatrix} I_{12} \\ I_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.006300 \\ 0.015567 \end{pmatrix} \quad (3.30)$$

Ainsi, les inclinaisons de Jupiter (I_1) et de Saturne (I_2) en fonction du temps s'écrivent :

$$\begin{aligned} I_1(t) &= \sqrt{0.0008534 - 0.0003594 \cdot \cos(-0.0001502t + 0.36654)} \quad (\text{en radians}) \\ &= \sqrt{0.0008534 - 0.0003594 \cdot \cos(-0.008608t + 21^\circ.0014)} \quad (3.31) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_2(t) &= \sqrt{0.0010560 - 0.0008881 \cdot \cos(-0.0001502t + 0.36654)} \quad (\text{en radians}) \\ &= \sqrt{0.0010560 - 0.0008881 \cdot \cos(-0.008608t + 21^\circ.0014)} \quad (3.32) \end{aligned}$$

Figure 3.13, je montre les inclinaisons de Jupiter (en vert) et Saturne (en rouge) sur 500.000 ans. On remarquera un déphasage d'un angle π entre $I_1(t)$ et $I_2(t)$, $t = 0$ correspond au 30 août 2011.

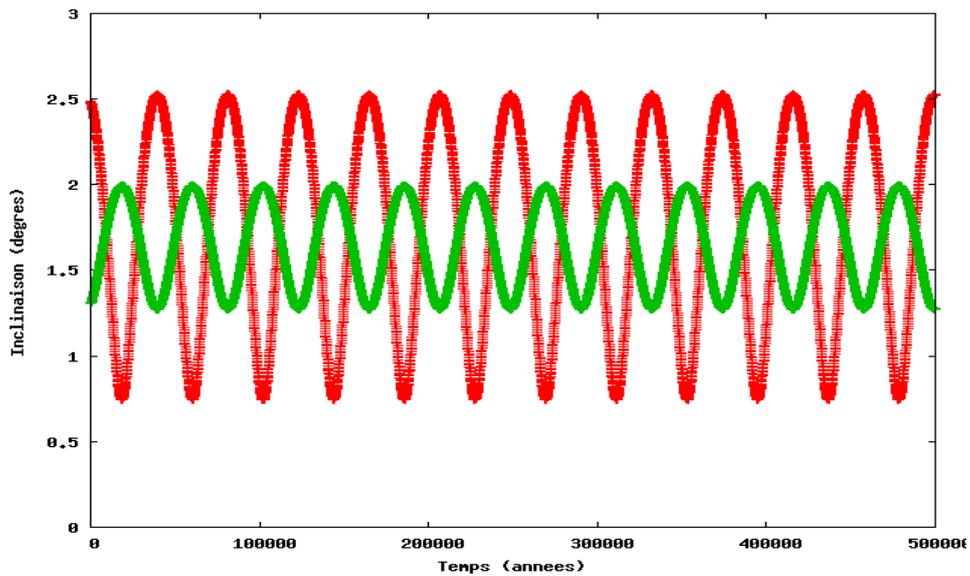


FIG. 3.13: Dans le cas de la théorie séculaire simplifiée ; inclinaisons de Jupiter (en vert) et Saturne (en rouge).

Je présente (Fig. 3.14) les variations associées pour les longitudes du nœud ascendant.

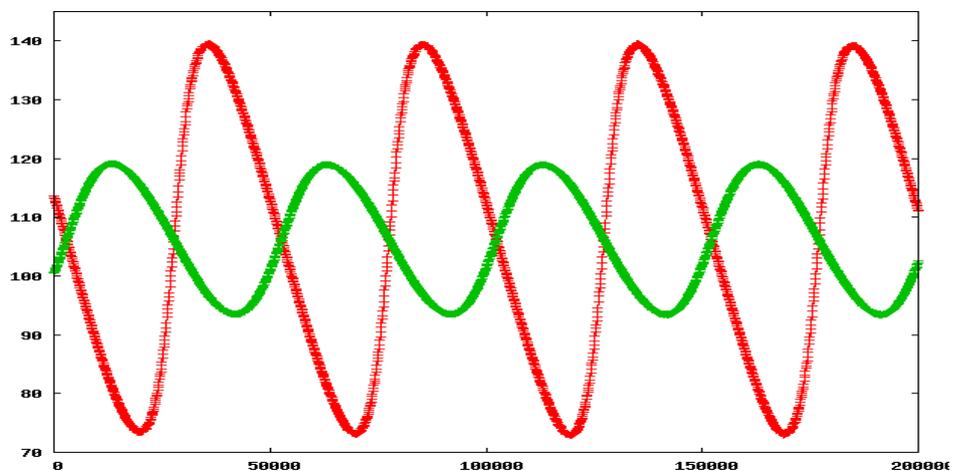


FIG. 3.14: Dans le cas de la théorie séculaire simplifiée ; longitudes des nœuds ascendants de Jupiter (en vert) et Saturne (en rouge).

Les variations séculaires associées sont également présentées dans l'espace (i, Ω) Fig 3.15. Nous pouvons, en observant la figure 3.15, d'ores et déjà nous douter de l'existence d'un rapport avec la distribution des astéroïdes observée Fig. 3.8. Ω ($^\circ$) varie dans l'intervalle [95,120] pour Jupiter et [73,140] pour Saturne, et la zone de maximum de concentration des astéroïdes semble correspondre aux zones de librations de ces deux planètes.

J'ai également reproduit les résultats semi-analytiques présentés plus haut à l'aide d'intégrations numériques.

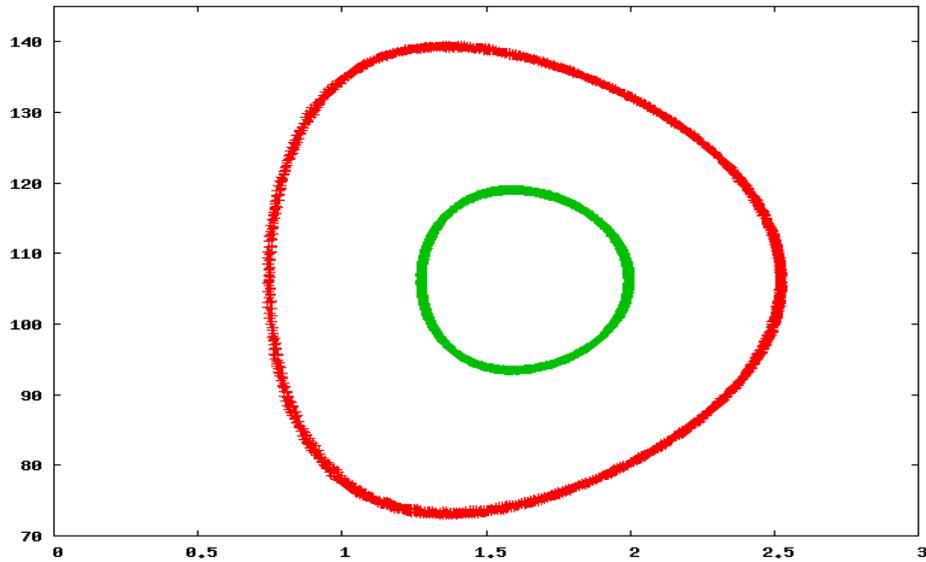


FIG. 3.15: Dans le cas de la théorie séculaire simplifiée ; représentation dans l'espace (i, Ω) : Jupiter (en vert) et Saturne (en rouge).

Les perturbations séculaires induites données par l'équation 3.2 sont fonctions des matrices A et B ainsi que des coefficients de Laplace elles-mêmes fonctions des masses et demi-grands axes des planètes, .

Je propose dans les quelques paragraphes qui suivent d'explorer brièvement cette dépendance, et ce en faisant varier uniquement le demi-grand axe de Saturne.

Dépendance en demi-grand axe

La dépendance en demi-grand axe intervient indirectement à travers les coefficients de Laplace. Je ne vais pas m'attarder sur cette partie puisque le but est juste de donner un aperçu de ce à quoi l'on peut s'attendre pour les astéroïdes.

Cette dépendance est illustrée Fig. 3.16. En effet, en faisant varier le demi-grand axe de Saturne entre 3,5190096 au et 53,5190096 au et en comparant avec le système défini (Table 3.3), on remarquera que pour :

$a_{Saturne} < a_{Jupiter}$ et par conséquent $\alpha_{12} > 1$, la libration (amplitude de cette libration, ou encore variations de i et Ω) de Saturne est beaucoup plus importante alors que celle de Jupiter l'est beaucoup moins ; de même, lorsque $a_{Saturne} > a_{Jupiter}$ et par conséquent $\alpha_{12} < 1$, l'amplitude de la libration (dans les deux sens inclinaison et nœud) de Saturne décroît pour un demi-grand axe qui croît. De même, pour une amplitude de libration (encore une fois de i et Ω) qui décroît pour Saturne, celle de Jupiter croît.

Les carrés bleus sur les figures désignent les conditions initiales pour chaque planète.

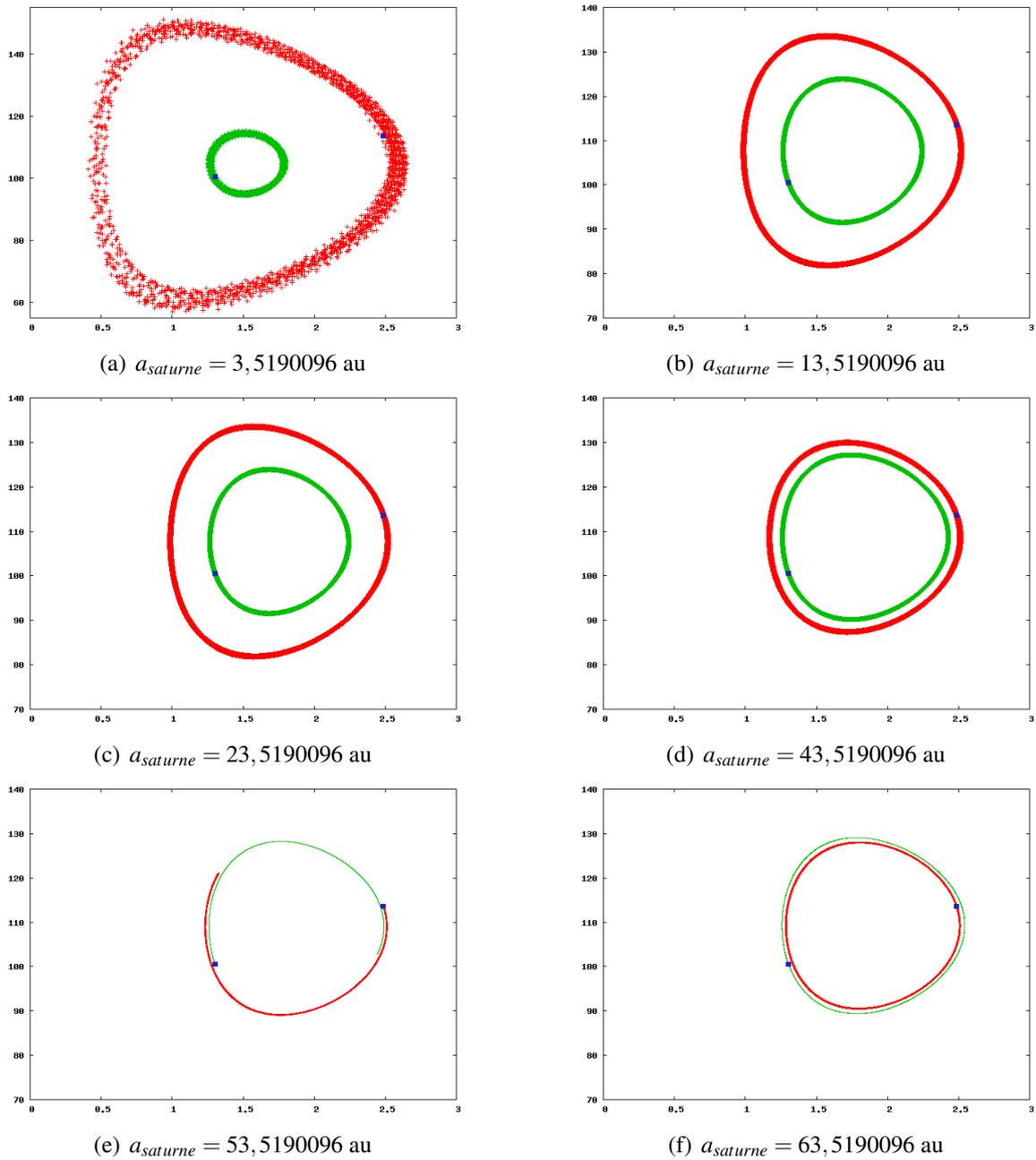


FIG. 3.16: Mouvement séculaire de Jupiter et Saturne : mise en évidence de l'effet de variation du demi-grand axe de Saturne dans le diagramme (i, Ω) .

CHAPITRE 3. ASTÉROÏDES DE LA CEINTURE PRINCIPALE : STRUCTURE À GRANDE ÉCHELLE

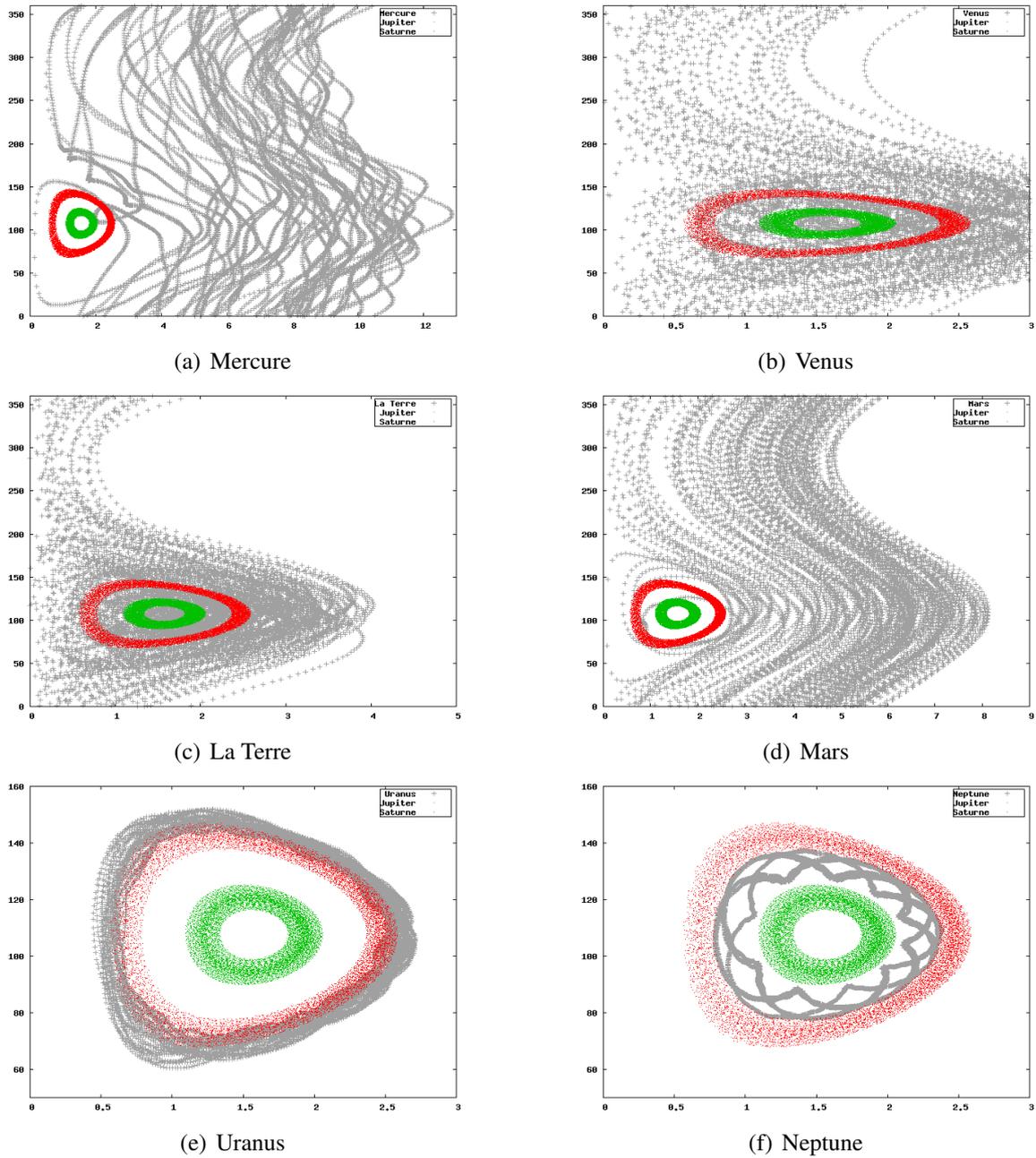


FIG. 3.17: Mouvement séculaire dans le diagramme (i, Ω) des planètes : en gris la planète indiquée sous chaque figure, en vert Jupiter et en rouge Saturne.

La figure 3.16 permet de visualiser la variation de l'effet séculaire forcé en fonction du demi-grand axe a_2 de Saturne. Plus le demi-grand axe de Saturne décroît, plus la libration de ce dernier est contrainte alors que celle de Jupiter l'est moins. Les résultats des intégrations numériques sont en accord avec ceux donnés par le modèle séculaire simplifié.

La série analytique (Eq. 3.22) pour le calcul des coefficients de Laplace n'étant pas toujours convergente, je procéderai dans le reste de ce manuscrit par intégrations numériques. Dans un système (Soleil + les huit planètes), je montre figure 3.17 les effets séculaires induits sur chaque planète sur 10 millions d'années. Les planètes géantes, de masses importantes²⁷, sont en librations dans l'espace (i, Ω) . Les planètes telluriques sont quant à elles en circulation dans cet espace, bien que les moins inclinées d'entre elles (ce qui exclut Mercure d'inclinaison égale à environ 7° par rapport à l'écliptique) passent plus de temps dans le voisinage de la région forcée.

Tous les paramètres physiques utilisés dans ce chapitre sont donnés Annexe C.

Planète	$\Omega(^{\circ})$ max	$\Omega(^{\circ})$ min	$i(^{\circ})$ max	$i(^{\circ})$ min
Jupiter	125,22	89,87	1,99	1,11
Saturne	147,55	68,04	2,52	0,58
Uranus	150,49	64,56	2,68	0,57
Neptune	131,78	80,58	2,38	1,72

TAB. 3.4: Limites des zones de libration des planètes géantes.

Je donne table 3.4 les limites en i et Ω qui définissent les zones de librations des planètes géantes dans le plan par rapport à l'écliptique-équinoxe J2000.0.

Pour les petits corps (1) Cérès, (2) Pallas et (4) Vesta, tous trois d'inclinaisons supérieures à 5° , les orbites circulent dans leurs plans orbitaux (Fig. 3.18).

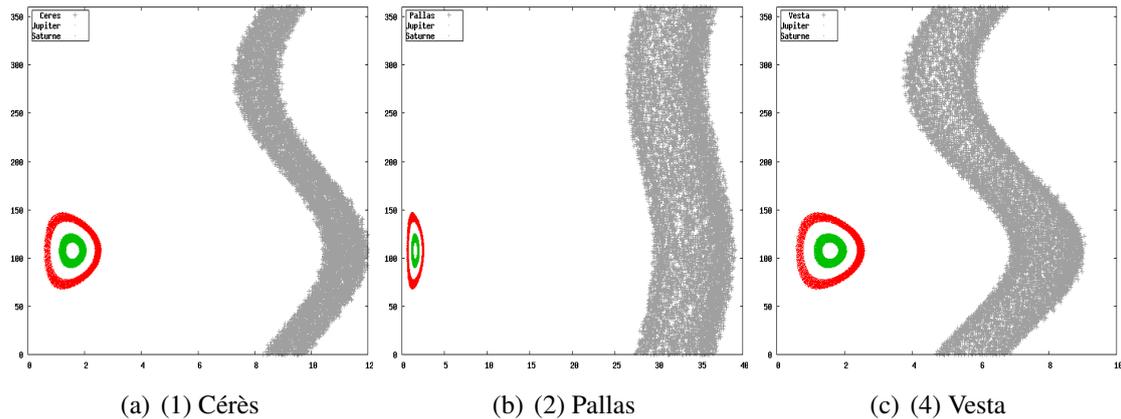


FIG. 3.18: Mouvement séculaire dans le diagramme (i, Ω) pour les petits corps (en gris) : (1) Ceres, (2) Pallas et (4) Vesta ; en vert Jupiter et en rouge Saturne.

Si j'ai choisi de mentionner les trois petits corps sus-cités dans cette section, c'est que je les ai considérés comme étant massifs dans mes intégrations.

²⁷Effet mis en évidence dans à travers la Figure 3.16

Nous pouvons distinguer trois types de dynamiques, à savoir :

- Les libérations pour les planètes géantes de petites inclinaisons (Figures 3.15, 3.17(e), 3.17(f) et Table 3.4).
- Les circulations “homogène” et “régulière” pour les petits corps massifs (1) Cérés, (2) Pallas et (4) Vesta d’inclinaison respectives $10^\circ.59$, $34^\circ.84$ et $7^\circ.13$ (Fig. 3.18).
- Les circulations que j’appellerai “hétérogènes” pour les planètes telluriques (Fig. 3.17(a) à 3.17(d)). J’entends par circulation hétérogène une circulation pour laquelle le corps passe plus de temps dans une région forcée, ce qui est par exemple flagrant dans le cas de la Terre 3.17(c).

Dans ce qui suit, je m’intéresse aux astéroïdes de la ceinture principale, considérés comme non-massifs, et montre que nous retrouvons bien les trois types de dynamiques dans le plan orbital et que cela explique la distribution observée figure 3.8.

3.5 Mouvement séculaire d’un astéroïde : effet de Jupiter et Saturne

La démarche analytique adoptée ici est similaire à celle de la Sect. 3.4.1, à savoir le Hamiltonien est tronqué à l’ordre deux en excentricités et inclinaisons.

J’utiliserai ici encore les notations de [Murray and Dermott, 1999], pour un astéroïde considéré sans masse, de demi-grand axe a et de moyen mouvement n ; la perturbation induite sur la particule test (l’astéroïde) considérée s’écrit :

$$\mathcal{R} = na \left[\frac{1}{2} A (h^2 + k^2) + \frac{1}{2} B (p^2 + q^2) + \sum_{j=1}^2 A_j (hh_j + kk_j) + \sum_{j=1}^2 B_j (pp_j + qq_j) \right], \quad (3.33)$$

où p et q sont les composantes du vecteur inclinaison de l’astéroïde, et :

$$B = -\frac{n}{4} \sum_{i=1}^2 \frac{m_i}{m_c} \alpha_i \bar{\alpha}_i b_{3/2}^{(1)}(\alpha_i), \quad (3.34)$$

$$B_i = \frac{n}{4} \frac{m_i}{m_c} \alpha_i \bar{\alpha}_i b_{3/2}^{(1)}(\alpha_i), \quad (3.35)$$

L’indice $i = 1$ désigne Jupiter et $i = 2$ désigne Saturne. Les définitions et propriétés des coefficients α et $\bar{\alpha}$, ainsi que des coefficients de Laplace sont données Sect. 3.4.1.

La solution du problème du mouvement séculaire induit sur le petit corps par l’effet cumulé de Jupiter et Saturne, a pour le vecteur inclinaison :

$$p(t) = I_{libre} \sin(Bt + \gamma) + p_0(t), \quad (3.36)$$

$$q(t) = I_{libre} \cos(Bt + \gamma) + q_0(t), \quad (3.37)$$

Elle s’écrit comme la somme des solutions des mouvement forcés ($p_0(t), q_0(t)$) et libres (périodiques d’amplitude I_{libre}).

Le mouvement *libre* dépend des conditions initiales du vecteur inclinaison, à travers I_{libre} qui est son amplitude et γ sa phase. Les angles γ_i sont ceux déterminés comme dans la Sect. 3.4.1.

Quant au mouvement *forcé*, il dépend du demi-grand axe par le biais des coefficients de Laplace. Il est donné par (Eqs 7.80 et 7.81 de [Murray and Dermott, 1999]) :

$$p_0(t) = -\sum_{i=1}^2 \frac{\mu_i}{B - f_i} \sin(f_i t + \gamma_i) \quad , \quad q_0(t) = -\sum_{i=1}^2 \frac{\mu_i}{B - f_i} \cos(f_i t + \gamma_i), \quad (3.38)$$

où

$$\mu_i = \sum_{j=1}^2 B_j I_{ji} \quad (3.39)$$

On peut associer à ce mouvement forcé une inclinaison forcée $I_{forcée}$ et un nœud $\Omega_{forcé}$. On écrira :

$$I_{forcée} = \sqrt{p_0^2 + q_0^2} \quad , \quad \tan \Omega_{forcé} = \frac{p_0}{q_0}, \quad (3.40)$$

Nous disposons maintenant de tous les éléments nécessaires pour nous intéresser aux effets séculaires de Jupiter et Saturne sur les astéroïdes, dans le cadre d'un modèle non-résonant et d'un développement jusqu'à l'ordre 2 en inclinaisons et excentricités.

J'ai donc appliqué cette théorie séculaire simplifiée à un échantillon de 50.000 particules fictives dans la ceinture principale, en excluant la région autour de 2,5 au (MMR 3 : 1 avec Jupiter). Dans l'espace (i, Ω) la répartition initiale est donnée Fig 3.19.

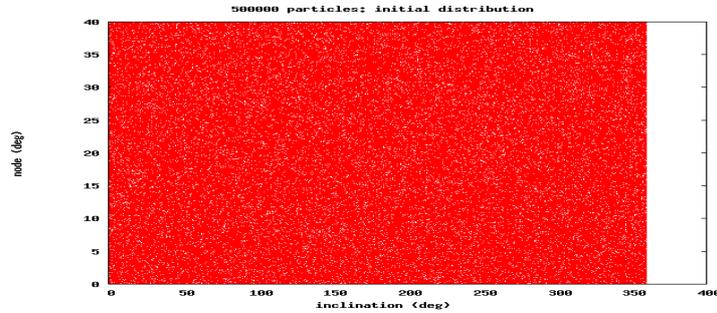
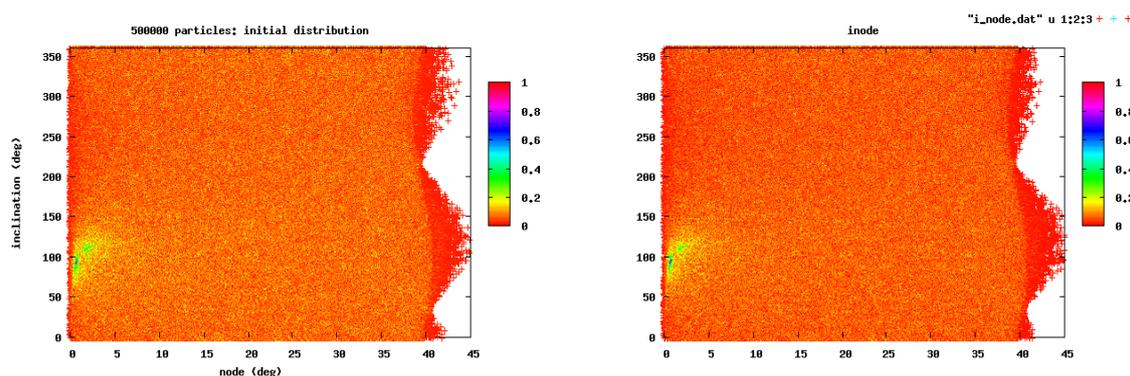


FIG. 3.19: Distribution (i, Ω) initiale des 50.000 particules fictives.

En considérant tout d'abord les perturbations séculaires de Jupiter puis celles de Jupiter et Saturne sur ces particules fictives, nous arrivons aux distributions représentées figure 3.20. Ce qui confirme que l'effet de Jupiter suffit largement à expliquer les vagues ou sinusoides observées. Celles-ci sont dues aux circulations des astéroïdes dans leurs plans orbitaux. Reste la question des densités de distributions observées (Fig. 3.8).

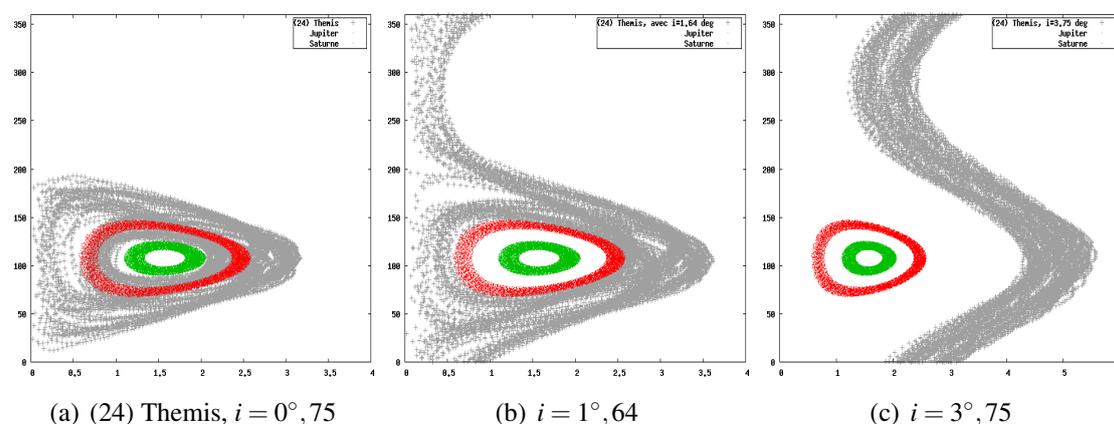
Dans la suite, je considère des astéroïdes réels et fictifs afin de montrer l'existence des trois dynamiques observées pour les corps massifs (Sect. 3.4.1). Je procède par intégrations numériques, sur 1 million d'années, en utilisant tout comme précédemment un intégrateur de Gauss-Radau [Eggl and Dvorak, 2010], dans le cadre d'un système solaire complet (Soleil et toutes les planètes).



(a) Densité de distribution conséquences des effets séculaires de Jupiter (b) Densité de distribution conséquences des effets séculaires de Jupiter et Saturne.

FIG. 3.20: Densité de distribution, conséquences des effets séculaires de Jupiter et Saturne sur 50.000 particules fictives (Fig. 3.19).

Considérons comme exemple l’astéroïde (24) Themis (Fig. 3.21(a)), de demi-grand axe $a = 3,14$ au, d’excentricité $e = 0,13$ d’inclinaison $i = 0^\circ,75$ et avec un nœud initial²⁸ $\Omega = 36^\circ,103$. Nous pouvons voir la libration de son plan orbital.



(a) (24) Themis, $i = 0^\circ,75$ (b) $i = 1^\circ,64$ (c) $i = 3^\circ,75$

FIG. 3.21: Mouvement séculaire dans le plan (i, Ω) pour l’astéroïde (24) Themis : $a = 3,14$ au, $e = 0,13$ et $i = 0^\circ,75$ (Fig. 3.21(a)). Les figures 3.21(b), 3.21(c) donnent ce même mouvement séculaire pour des Themis fictifs d’inclinaisons respectives de $1^\circ,64$ et $3^\circ,75$; en vert Jupiter et en rouge Saturne.

En augmentant progressivement son inclinaison à $i = 1^\circ,64$ puis $i = 3^\circ,75$, nous constatons respectivement figures 3.21(b) et 3.21(c) le passage progressif à une circulation homogène et totale à partir d’une certaine valeur de l’inclinaison.

Dans la Table 3.5, je donne pour chacun des astéroïdes (Fig. 3.21(a) à 3.21(c)) une estimation du temps passé par ces derniers entre les valeurs maximales et minimales du Ω de la zone de

²⁸à l’époque MJD=56200.000, i.e 30 Septembre 2012.

Astéroïde	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune
Fig. 3.21(a)	30,63%	70,67%	75,33%	47,62%
Fig. 3.21(b)	21,35%	50,29%	55,18%	31,15%
Fig. 3.21(c)	14,23%	31,50%	33,89%	20,52%

TAB. 3.5: Pour chaque astéroïde (3.21) pourcentage de temps passé entre les valeurs maximales et minimales du nœud des mouvements forcés des planètes géantes.

libration des planètes géantes (Table 3.4).

L’astéroïde en libration (Fig. 3.21(c)) passe deux fois (respectivement une fois et demi) plus de temps dans la zone de libration (en nœud) délimitée par les planètes géantes que l’astéroïde en circulation totale homogène Fig. 3.21(a) (respectivement l’astéroïde en circulation “hétérogène” Fig. 3.21(c)).

Un astéroïde fictif (24) Themis (Fig. 3.21(b)), avec une inclinaison de $i = 1^\circ,64$ en circulation “hétérogène”, passe donc 70,67% de son temps avec un nœud compris entre $68^\circ,04$ et $147,55^\circ$ et moins de 30% du temps (sur les 1 million d’années) sur les 280° restants

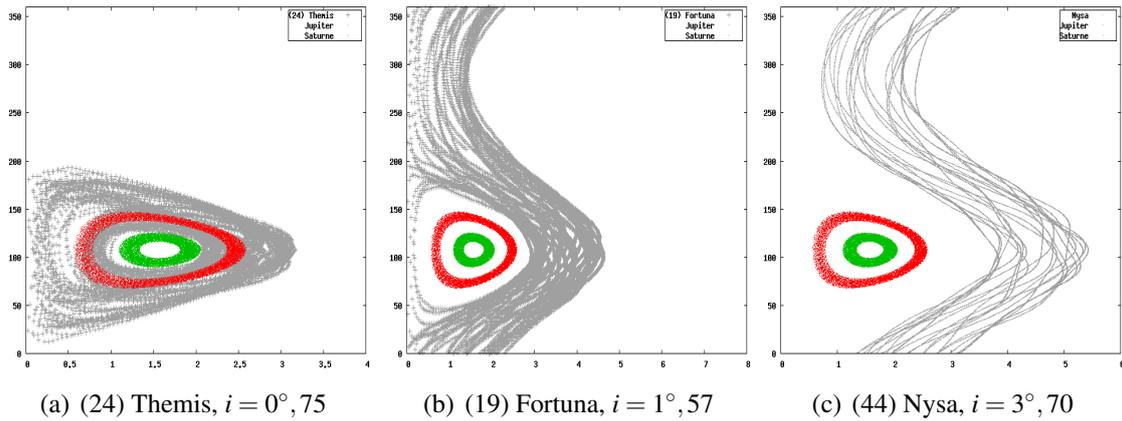


FIG. 3.22: Mouvement séculaire dans le plan (i, Ω) pour quelques astéroïdes (en gris) de la ceinture principale, en vert Jupiter et en rouge Saturne.

A titre d’exemple, je présente figure 3.22 la courbe $(i(t), \Omega(t))$ pour trois exemples de la ceinture principale (24) Themis, (19) Fortuna et (44) Nysa; on retrouve bien les trois types de dynamiques. De même pour chacun de ces corps je donne (Fig. 3.23) leur représentation dans le diagramme (q, p) .

Remarquons que l’astéroïde (44) Nysa qui se trouve pourtant dans la zone de concentration maximale (Fig. 3.8) est en circulation contrairement à ce q’on aurait pu croire.

A travers les résultats présentés ici (Fig. 3.21 et Table 3.5), j’ai mis en évidence la dépendance en I_{libre} de la dynamique des plans orbitaux (i, Ω) . Pour des I_{libre} très petits les orbites sont en libration, plus I_{libre} croît plus les dynamiques dans (i, Ω) tendent vers des orbites en circulation.

La figure 3.24 montre qu’une grande partie des astéroïdes ont une inclinaison inférieure à 5° , ils se retrouvent donc avec des orbites en libration totale ou partielle.

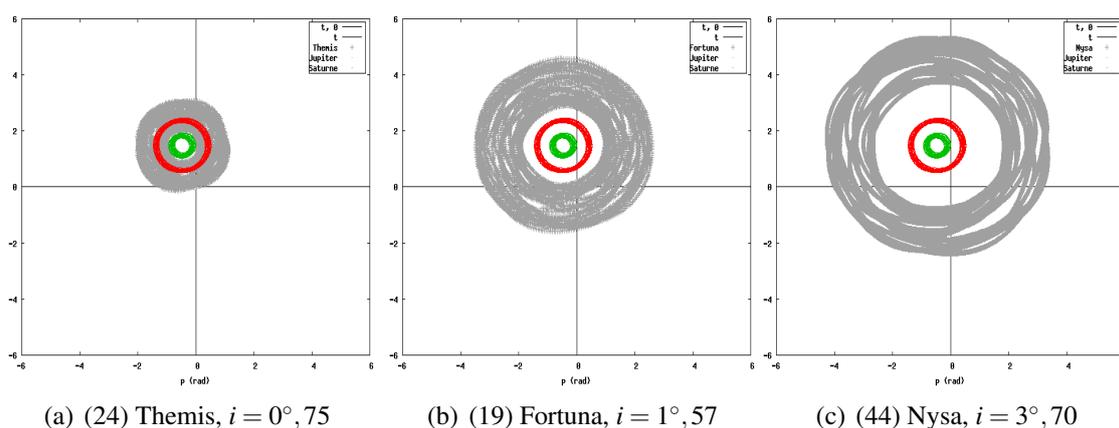


FIG. 3.23: Mouvement séculaire dans le plan (i, Ω) pour quelques astéroïdes (en gris) de la ceinture principale, en vert Jupiter et en rouge Saturne.

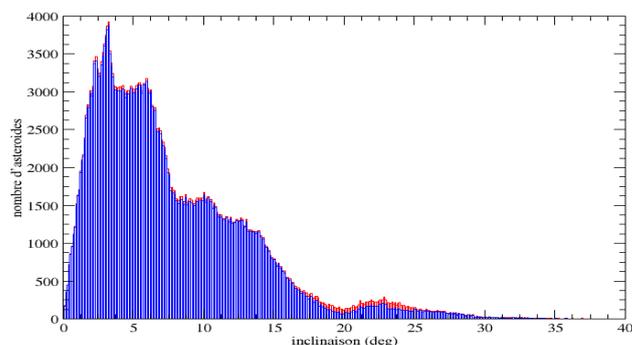


FIG. 3.24: Histogramme des inclinaisons sur la population entière d'astéroïdes en rouge et uniquement sur la ceinture principale en bleu.

3.6 Résumé et questions ouvertes

Je me suis intéressée tout au long de ce chapitre à l'étude de la dynamique globale des astéroïdes de la ceinture principale pour essayer de comprendre leurs distributions en plans orbitaux. Nous avons pu voir que cette répartition des astéroïdes en plans orbitaux (i, Ω) est justifiée par les effets séculaires induits par les planètes géantes, en particulier par Jupiter. Nous avons été capables de distinguer trois types de dynamique : une en libration, une en circulation globale mais passant la majorité de son temps dans la zone de libration définie par les planètes géantes, enfin une dernière en circulation totale et homogène. La dynamique dépend de l'inclinaison libre du corps. Nous avons également pu illustrer par l'exemple du système Soleil-Jupiter-Saturne l'effet du demi-grand axe sur l'amplitude de la libration ceci est, bien sûr, également le cas pour la circulation à travers les coefficients de Laplace.

Même si nous sommes capables de justifier le comportement dynamique globale qui conduit à une telle distribution, nous ne sommes toujours pas capables de déterminer les conditions initiales pour arriver à la distribution actuelle.

CHAPITRE 4

ETUDE DYNAMIQUE DE LA FAMILLE VESTA

Ten thousand difficulties do not make one doubt.
- John Henry Newman (1801-1890).

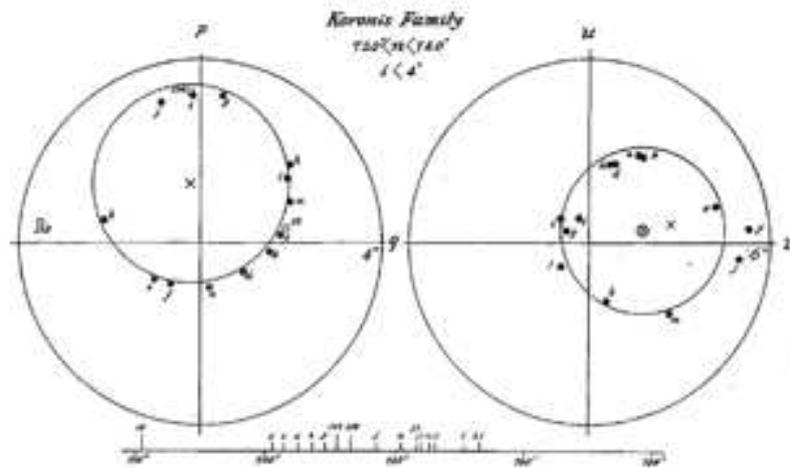
Dans le chapitre précédent je m'étais intéressée aux distributions spatiales des astéroïdes dans les espaces définis par les éléments osculateurs¹. Je me suis penchée sur la distribution en matière de plans orbitaux (I, Ω) et en suis arrivée à la conclusion que celle-ci est conséquence des effets séculaires des planètes géantes et en particulier de Jupiter.

Dans ce chapitre, j'étudierai un autre type de distributions, à savoir, celle définie dans l'espace des éléments propres (a, e, i) . La notion de famille d'astéroïdes étant souvent associée à une métrique définie sur cet espace, je rappellerai les nomenclatures associées à cette notion. Cependant ce concept étant relativement récent dans l'histoire de la mécanique céleste (1918 [Hirayama, 1918]), je commencerai par donner un aperçu de son évolution depuis les premiers travaux de K. Hirayama sur le sujet [Hirayama, 1918]. Si je m'attarde un peu sur cette partie c'est pour pouvoir comprendre les méthodes actuelles qui nous permettent de discriminer les familles d'astéroïdes.

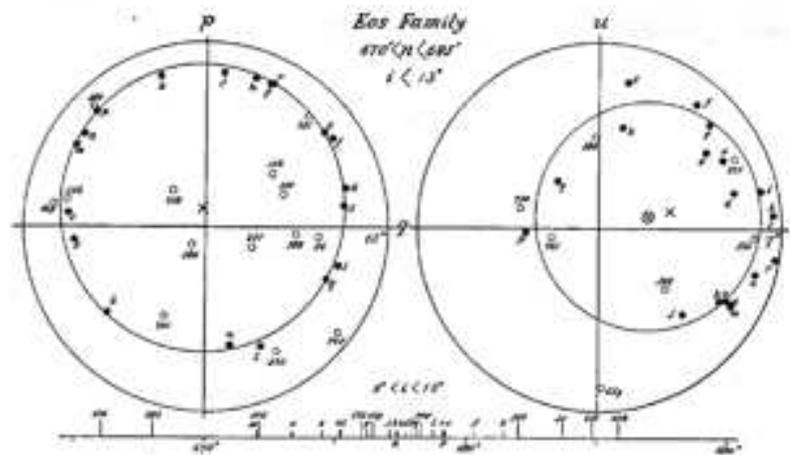
Enfin je me pencherai sur l'étude dynamique de la famille de l'astéroïde (4) Vesta, le plus gros de la ceinture principale d'astéroïde² et cible de la mission DAWN [Vernazza et al., 2005]. Le but de mission est de cartographier et d'effectuer des mesures spectrales des surfaces des petits corps Cérès et Vesta.

¹éléments osculateurs, du verbe latin *osculare* qui signifie "embrasser" [Murray and Dermott, 1999]

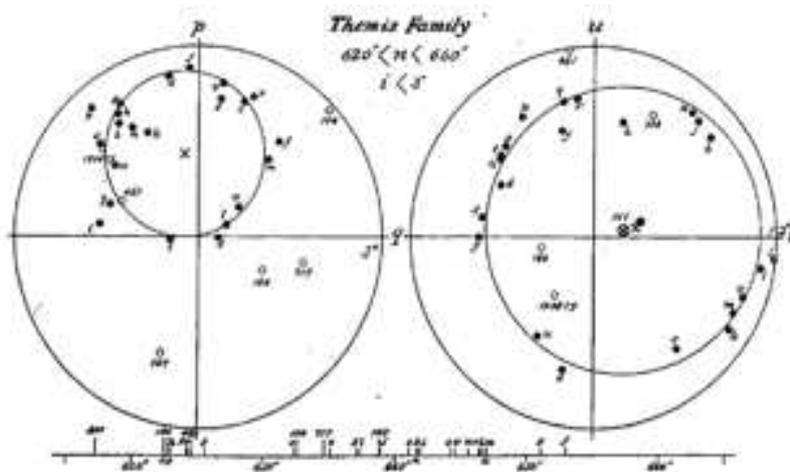
²Cérès n'étant pas un astéroïde mais une planète naine.



(a) Famille Koronis



(b) Famille Eos



(c) Famille Themis

FIG. 4.1: Les trois familles identifiées par Hirayama représentées dans les espace (p, q) et (u, v) [Hirayama, 1918].

4.1 Les familles d'astéroïdes

4.1.1 Familles Hirayama

Kiyotsugu Hirayama (1874-1934) introduira en 1918 pour la première fois le concept de famille d'astéroïdes [Hirayama, 1918] ; astéroïdes ayant une seule et même origine. Dans son article, il identifiera sur un échantillon de 790 astéroïdes, les groupements dans l'espace (n, α) (n étant le moyen mouvement ; $\alpha \in \{i, e\}$ en éléments osculateurs).

Sa démarche sera purement statistique, sans aucun principe dynamique. Il divisera son espace en intervalles $[n, \alpha : \alpha + 4]$ et évaluera la fraction (nombre d'astéroïdes dans $[n, \alpha : \alpha + 4]$)/(nombre d'astéroïdes dans $[:, \alpha : \alpha + 4]$). Il en ressortira l'identification de trois familles : (158) Koronis (13 membres), (221) Eos (19 membres) et (24) Themis (22 membres).

En représentant les trois familles identifiées dans les espaces (q, p) et (u, v) (Fig. 4.1) il remarquera que les astéroïdes sont sur un seul et même cercle (ou presque). Dans l'espace (q, p) des composantes du vecteur inclinaison, il remarquera que le centre du cercle est proche de $(q_{jupiter}, p_{jupiter})$ et en déduira que ces distributions sont liées aux effets séculaires de Jupiter.

Dans [Hirayama, 1919], une étude similaire est effectuée sur un échantillon de 777 astéroïdes cette fois dans l'espace (n, j, M) (n est le moyen mouvement, j l'inclinaison par rapport au plan orbital de Jupiter et M une fonction des excentricités de l'astéroïde et de Jupiter). Les trois familles précédentes sont confirmées ; de nouvelles familles sont identifiées : (286) Iclea (6 membres), (13) Egeria (12 membres), (8) Flora (17 membres) et (291) Alice (avec 3 membres) ; ainsi que d'autres familles potentielles (avec un doute important) dont celle de l'astéroïde (4) Vesta.

Dans ses trois publications ultérieures Hirayama se pose la question de définir l'espace approprié à l'étude des familles [Hirayama, 1922] :

"... while the pericentre and the node revolve incessantly, the mean values of the eccentricity and the inclination remain absolutely invariable. Which leads us to the idea of the *invariable elements* which being taken instead of the ordinary elements, may serve for the detection of groups, or of the *families* which have been particularly named by the author."

Il abordera le problème dans l'espace des éléments propres (*invariable elements*) et non dans l'espace des éléments osculateurs 1922JaJAG...1...55H, [Hirayama, 1928], [Hirayama, 1933] et confirmera l'existence des familles des astéroïdes : (24) Themis, (221) Eos, (158) Koronis, (8) Flora et (170) Maria. Ces cinq familles sont connues aujourd'hui sous le nom des *Familles de Hirayama*.

4.1.2 Autres études statistiques

Brouwer s'intéresse lui aussi au problème de la détermination des familles d'astéroïdes dans l'espace des éléments propres [Brouwer, 1951]. Il identifie 29 familles dont les cinq familles Hirayama. Il finit cependant par diviser la famille Flora en quatre, dans l'espace (π_1, θ_1) (π_1 est la longitude du périhélie et θ_1 la longitude du nœud).

J. Arnold trouvera trente trois familles et confirmera ainsi l'existence de celles identifiées par Hirayama et Brouwer [Brouwer, 1951]. Les méthodes utilisées par Hirayama, Brouwer ou même Clemece reposent toutes sur des arguments statistiques dans l'espace des éléments propres depuis [Hirayama, 1922].

Pour Hirayama, une *famille d'astéroïdes* est l'ensemble des corps provenant d'un seul et même corps parent après la fragmentation de ce dernier. Il ne parlera jamais de collision, juste de fragmentation.

4.1.3 Etudes dynamiques

Lindblad et Southworth introduisent pour la première fois un critère dynamique au problème [Lindblad and Southworth, 1971] sur la base du *D-criterion*. Ce dernier est utilisé pour l'identification des essais météoritiques [Southworth and Hawkins, 1963]. Il est défini dans l'espace des éléments osculateurs $(q, e, i, \omega, \Omega)$. Pour chaque couple de corps (M,N) est calculée la distance $D(M,N)$:

$$\begin{aligned} D(M,N)^2 = & (e_N - e_M)^2 + (q_N - q_M)^2 + \left(2 \sin \frac{i_N - i_M}{2}\right)^2 \\ & + \sin i_M \sin i_N \left(2 \sin \frac{\Omega_N - \Omega_M}{2}\right)^2 \\ & + \left(\frac{e_M + e_N}{2} 2 \sin \frac{\Omega_N + \omega_N - \Omega_M - \omega_M}{2}\right)^2 \end{aligned} \quad (4.1)$$

Pour un corps parent M, tous les corps N à une distance $D(M,N)$ inférieure à une vitesse seuil D_{seuil} proviennent de M. Reste à définir D_{seuil} , ce qui reste très vague.

Lindblad reviendra lui aussi vers l'utilisation des éléments propres, en s'affranchissant cette fois, des variations angulaires à courtes et longues périodes dans 4.1 :

$$D(M,N)^2 = (e_N - e_M)^2 + (q_N - q_M)^2 + \left(2 \sin \frac{i_N - i_M}{2}\right)^2 \quad (4.2)$$

la caractérisation de D_{seuil} n'en sera pas mieux définie, [Lindblad, 1992] :

" Unfortunately the criterion for family membership is not always stated, and it appears that the limits of a family in proper element space are largely a matter of personal judgment."

4.1.4 Ecriture de la métrique

Les membres d'une famille sont des fragments provenant d'un même corps. Les équations de Gauss post-ejecta pour les fragments [Brouwer and Clemence, Dec 1961], dans l'espace des éléments osculateurs, s'écrivent :

$$2\delta v_1/na = (\delta a/a), \quad (4.3)$$

$$2\delta v_2 \sin(f)/na + 2\delta v_1 \cos(f)/na = \delta e, \quad (4.4)$$

$$\delta v_3 \cos(\omega + f)/na = \delta i, \quad (4.5)$$

En moyennant sur les angles (f) (anomalie vraie) et ($f + \omega$) (ω est l'argument du périhélie), la norme de la vitesse s'écrit :

$$\delta v = na \sqrt{x(\delta v_1^2) + y(\delta v_2^2) + z(\delta v_3^2)} \quad (4.6)$$

ou encore :

$$\delta v = na \sqrt{k_1(\delta a/a)^2 + k_2(\delta e)^2 + k_3(\delta \sin i)^2} \quad (4.7)$$

où $k_i \in \mathbb{Q}$, $i = 1, 3$.

Les constantes usuelles utilisées sont : $k_1 = 5/4$, $k_2 = 2$, $k_3 = 2$ [Zappala et al., 1990].

Dans le cadre d'une théorie séculaire linéaire [Brouwer, 1951], l'équation 4.7 s'écrit :

$$\delta v = na_p \sqrt{k_1(\delta a_p/a_p)^2 + k_2(\delta e_p)^2 + k_3(\delta \sin i_p)^2} \quad (4.8)$$

où (a_p, e_p, i_p) sont les éléments propres qui ne sont rien d'autres que des constantes du mouvement.

Cette métrique est aujourd'hui adoptée de tous. Notons qu'il en existe une variante qui prend en considération les propriétés physiques. Pour deux corps A, B (supposons A le corps parent d'éléments propres (a, e, i)), la métrique [Nesvorný et al., 2005] s'écrit :

$$d(A, B) = na \sqrt{C_a(\delta a/a)^2 + C_e(\delta e)^2 + C_i(\delta \sin i)^2 + C_{PC}(\delta PC_1)^2 + C_{PC}(\delta PC_2)^2}, \quad (4.9)$$

PC_1 et PC_2 (Principal Components) sont les composantes taxonomiques principales, fonctions des cinq bandes de couleurs (u, g, r, i, z) :

$$PC_1 = 0.396(u - g) + 0.553(g - r) + 0.567(g - i) + 0.465(g - z), \quad (4.10)$$

$$PC_2 = -0.819(u - g) + 0.017(g - r) + 0.090(g - i) + 0.567(g - z), \quad (4.11)$$

avec les constantes $C_a = \frac{5}{4}$, $C_e = 2$, $C_i = 2$ and $C_{PC} = 106$.

La distance dans les deux cas (équations 4.8 et 4.9) est donnée en m/s.

Nous savons aujourd'hui que les éléments propres peuvent subir d'importants changements, conséquence de rencontres proches, de collisions avec des astéroïdes massifs, de captures dans des zones de résonances et même d'effets non-gravitationnels purement thermiques. A titre d'exemple l'effet Yarkowsky (cf. Annexe C) engendre des variations du demi-grand axe de l'astéroïde

V. Carruba et T. A. Michtchenko [Carruba and Michtchenko, 2007], [Carruba and Michtchenko, 2009] aborderont le problème dans l'espace des fréquences propres (n, g, s) , ou même dans un espace combinant éléments et fréquences propres dans les zones de fortes résonances (2 :1 et 3 :1).

La métrique adoptée dans ce travail est celle donnée par l'équation 4.8, les éléments propres

sont (a,e,i)³ ceux de la base de données AstDyS-2⁴ [Knežević and Milani, 2003].

4.1.5 Méthodes

Divers travaux abordant le problème de la détermination des familles d'astéroïdes, de K. Hirayama (1918,1919,1920,1922,1928 et 1933) jusqu'au début des années 1990, ont fourni des résultats souvent contradictoires. Ceci s'explique par la multitude de méthodes et critères utilisés de même que la non-unification des méthodes de calculs des éléments propres [Zappalà et al., 1992], [Cellino and Dell'Oro, 2010].

Au début des années 1990, deux méthodes ont été développées, de manière indépendante pour la détection d'astéroïdes :

- la méthode HCM (Hierarchical Clustering Method) : développée à Turin, est la plus utilisée aujourd'hui. Elle consiste en la détection de 'clusters' dans l'espace des éléments propres auquel est associée une métrique (dans notre cas la métrique est donnée Eq. 4.8) [Zappalà et al., 1990], [Cellino and Dell'Oro, 2010].
 - Pour chaque couple d'astéroïdes la distance est calculée.
 - Le couple (i,j) de plus petite distance est identifié (plus proches voisins (*ppv*)).
 - Les objets i et j sont conglomérés et ils ne forment plus qu'un. Pour tout élément k du reste de la population sa distance à $\{i\} \cup \{j\}$ est donnée par le minimum des distances $d(i,k)$, $d(j,k)$. k est donc le plus proche des *ppv*.
 - Cette dernière étape est alors réitérée de manière à construire le dendrogramme (Fig. 4.2) de l'astéroïde parent (dans notre cas celui de l'astéroïde (4) Vesta), jusqu'à ce que la distance au plus proche *ppv* soit supérieure à la distance limite.

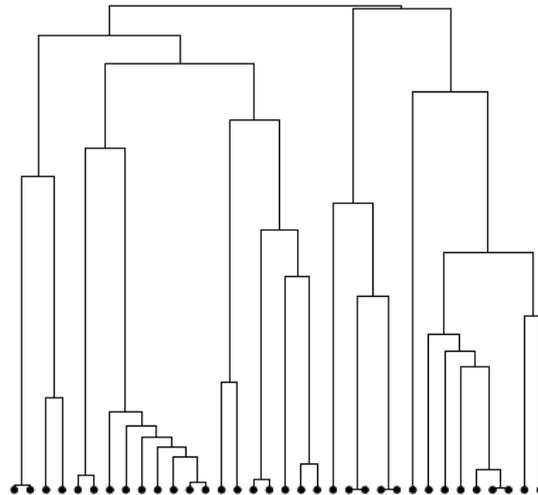


FIG. 4.2: Illustration d'un dendrogramme.

³l'inclinaison propre est donnée par rapport à l'écliptique moyen de J2000.0. Faisons remarquer que pour le Troyens de Jupiter et dans le cadre du projet Petra (Proper Elements of the Trojan Asteroids : <http://www.daf.on.br/froig/petra/description.htm#identification>) les inclinaisons propres sont données par rapport au *Plan Invariable* du système solaire externe [Nobili et al., 1989].

⁴<http://hamilton.dm.unipi.it/astdys/index.php?pc=5>

- WAM (Wavelet Analysis Method) : L'analyse par ondelettes dans le contexte de la détermination des astéroïdes, ayant fait ses preuves en cosmologie, a été développée à Nice [Bendjoya et al., 1991]. Cette méthode, mathématiquement très élégante [Bendjoya and Slezak, 1993], peut fournir une analyse multi-dimensionnelles (3D [Bendjoya, 1993b], [Bendjoya, 1993a]), ce qui n'est pas le cas de la méthode HCM. Cependant elle est lourde à programmer et très consommatrice de temps CPU. Les deux méthodes HCM et WAM fournissent des résultats équivalents [Bendjoya et al., 1992], [Zappala et al., 1995] ; néanmoins la première moins lourde sera adoptée.

4.1.6 Nomenclature

Le terme de 'famille' étant souvent utilisé de manière abusive il m'a semblé important de consacrer quelques lignes à la présentation de la nomenclature proposée par Farinella et ses collaborateurs [Farinella et al., 1992].

D'un point de vue purement dynamique, les astéroïdes appartenant à une seule et même famille sont très proches dans l'espace des éléments propres sur des temps très longs ceci résultant des faibles vitesses des fragments. Dans le cadre d'une théorie séculaire [Brouwer, 1951], cela donne lieu à la métrique donnée par l'équation 4.8.

D'après la nomenclature introduite dans [Farinella et al., 1992], un groupement d'astéroïdes identifié par une métrique (ex. [Zappala et al., 1990], [Carruba and Michtchenko, 2009]) dans l'espace des éléments (ou fréquences) propres, par une méthode tel que la HCM ou la WAM, est un "*clumps*" (*Famille de type II*) si le groupement est identifié de manière univoque ; si ce n'est pas le cas on parlera de "*clans*" (ou encore "*Tribes*" -familles de type III-).

On ne parlera de "famille", au sens usuel du terme (*Famille de type I* au sens de [Farinella et al., 1992]), que si des éléments physiques observationnels viennent appuyer l'existence des "clusters" ou des "clans" par l'identification de propriétés physiques similaires.

Dans ce chapitre je présente les résultats d'une étude effectuée sur l'évolution à long terme de la *famille dynamique* (clump) de l'astéroïde (4) Vesta⁵ [Souami et al., 2012a].

4.2 Etude de la famille Vesta

La famille Vesta fait l'objet de plusieurs études depuis quelques années. Dernièrement la question de la diffusion de la famille, en évaluant les effets des rencontres proches et des effets thermiques Yarkowsky/YORP sur la dérive en demi-grand axe, a été abordée [Delisle and Laskar, 2012], [Carruba et al., 2012b]. Ici je m'intéresse à la diffusion de la famille par l'effet Yarkowsky ainsi qu'aux rencontres proches avec les astéroïdes massifs.

Dans notre étude [Souami et al., 2012a] nous étudions l'évolution dynamique de 1350 astéroïdes de la famille Vesta sur 10 millions d'années⁶. Je présente dans ce chapitre les résultats

⁵dans la suite de ce manuscrit, je parlerai de la "famille Vesta" pour des raisons de simplicité du langage.

⁶Par manque de ressources de calcul nous avons dû nous restreindre à une étude sur 10 millions d'années.

de cette étude pour 330 astéroïdes et les compare à ceux obtenus dans [Delisle and Laskar, 2012], [Carruba et al., 2012b].

La table 4.1 résume les caractéristiques de chacune de ces études numériques [Delisle and Laskar, 2012], [Carruba et al., 2012b] et [Souami et al., 2012a]. Les résultats de ces études ne peuvent être considérés que comme complémentaires. Les études [Delisle and Laskar, 2012], [Carruba et al., 2012b] se sont intéressées à la diffusion de la famille Vesta, conséquence de rencontre proches avec l'astéroïde (4) Vesta et des autres astéroïdes massifs considérés. Ils ont montré que la diffusion due aux rencontres proches dominait pour les astéroïdes de diamètres $D > 20$ km. De même que Carruba et ses collaborateurs [Carruba et al., 2012b] se sont intéressés à l'effet des astéroïdes massifs sur les fréquences propres de l'astéroïde (4) Vesta.

Dans [Delisle and Laskar, 2012] il est également montré que la plupart des rencontres proches des membres de la famille dynamique Vesta sont avec le corps parent (4) Vesta ou avec la planète naine (1) Cérès.

Etude	Delisle et Laskar 2012	Carruba et al. 2012	Ici
Intégrateur	Symplectique SABA4 [Laskar and Robutel, 2001]	Symplectique Sao Paulo	Gauss-Radau [Eggl and Dvorak, 2010]
Pas d'intégration	5×10^{-2} ans (fixe)	2 jours (fixe)	variable :-max : 2,5 jours -min $5,8 \times 10^{-13}$ jours
Petits corps massifs	11 petits corps	55 petits corps	(1) Cérès, (2) Pallas et (4) Vesta
Effets relativistes	oui	non	oui
Effets dissipatifs	analytiquement	Yarkowsky + YORP	Yarkowsky
Intégration sur	30 Myr	30 Myr	10 Myr

TAB. 4.1: Caractéristiques des intégrations

4.2.1 Etude de l'effet Yarkowsky

paramètre	valeur	source
Période sidérale	$5.34212971 \pm 0.00000096$ h	1
Surface density ρ_0	2.96 ± 0.10 g/cm ³	2
Bulk density ρ	3.58 ± 0.15 g/cm ³	3
Diamètre	519.33 ± 6.84 km	3
Inertia thermique Γ	$25 \text{Jm}^{-2} \text{K}^{-1} \text{s}^{-\frac{1}{2}}$	4
Capacité thermique	800	5
Conductivité thermique	0.2639	calculée
absorbitivité	0.6	6

TAB. 4.2: Paramètres physiques de l'astéroïdes (4) Vesta.

Références : 1 : [Vernazza et al., 2005], 2 : [Descamps, 2010], 3 : [Carry, 2012], 4 : [Mueller and Lagerros, 1998], 5 : [Schiller et al., 2011], 6 : [Redman et al., 1998].

Notre étude s'intéresse aux petits membres de la famille Vesta, notamment les résultats présentés ici concernent les astéroïdes ayant un diamètre $D < 7$ km, population pour laquelle les effets dissipatifs dominant.

Le modèle de l'effet Yarkowsky utilisé dans cette thèse est celui de Vokrouhlický [Vokrouhlický, 1999] (cf. Annexe C). Les astéroïdes faisant partie de la famille dynamique Vesta, on supposera qu'ils ont également les mêmes propriétés physiques que l'astéroïde (4) Vesta (i.e qu'ils proviennent de ce dernier). Les paramètres physiques utilisés sont donnés Table 4.2. Seul l'effet diurne est considéré, celui-ci étant maximal pour une obliquité nulle.

En ce qui concerne l'obliquité de l'astéroïde (notée γ , eq. C.4), on considèra les deux cas qui correspondent à une variation maximale du demi-grand axe : $\gamma = 0^\circ$ qui engendre une augmentation du demi-grand axe et $\gamma = 180^\circ$ qui entraîne sa diminution.

Je présente figure 4.3, $\frac{da}{dt}$ la variation du demi-axe en fonction de diamètre D de l'astéroïde. Les points en gris correspondent à une obliquité $\gamma = 0^\circ$, en vert $\gamma = 180^\circ$. En rouge est tracée la fonction donnant la dérive du demi-grand axe en fonction du diamètre pour les corps basaltiques. Cette fonctions donnée dans [Nesvorný et al., 2008] s'écrit :

$$\frac{da}{dt} = 5 \times 10^{-4} \left(\frac{5 \text{ km}}{D} \right) \cos \gamma \quad \text{au/Myr} \quad (4.12)$$

Notre étude numérique ainsi que la formulation de la dérive $\frac{da}{dt}$ fournissent des résultats très proches.

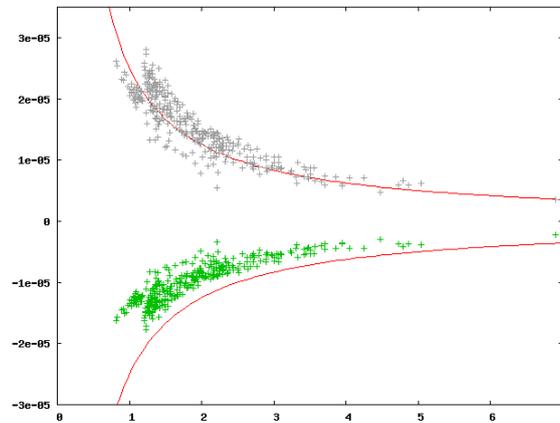


FIG. 4.3: Variation (induite par effet Yarkowsky diurne) du demi-grand axe en fonction du diamètre de l'astéroïde.

Pour conclure, nous estimons l'effet Yarkowsky moyen pour les astéroïdes de dimaètres $D < 7$ km :

$$\frac{\bar{da}}{dt} = 7.9 \times 10^{-6} \text{ au/Myr (dans le cas } \gamma = 0^\circ) \text{ et } \frac{\bar{da}}{dt} = -4.7 \times 10^{-6} \text{ au/Myr (dans le cas } \gamma = 180^\circ).$$

Aujourd'hui l'effet Yarkowsky est évoqué comme à l'origine de la présence de corps de type-V (fragments potentielles de Vesta) et des météorites de type HED sur Terre (ces météorites représentent 6% des météorites récoltés sur Terre). L'effet Yarkowsky entrainerait donc les petits corps de la famille Vesta vers les zones de résonances ν_6 et 3 :1 qui se chargeraient à leurs

tours de leur délivrance vers l'intérieur du système solaire en moins de 10 millions d'années [Migliorini et al., 1997].

Nous avons présentés [Galiazzo et al., 2012], [Souami et al., 2012a] des résultats préliminaires (qui ne s'inscrivent pas dans le cadre de ma thèse) sur le problème de survie des astéroïdes dans les résonances ν_6 et 3 : 1. Ces petites études sur des populations fictives nous ont amenées à conclure que les zones de résonances ν_6 et 3 : 1 délivrent les astéroïdes vers l'intérieur en des temps relativement courts (moins de 10 millions d'années). Ce que je donne Table 4.2.1⁷

Groupe NEA Conditions initiales	Amors		Appolos	
	ν_6	3 : 1	ν_6	3 : 1
Temps (millions d'années)	5.58	8.46	6.63	9.00

4.2.2 Rencontres proches : vitesses relatives

Je me suis également intéressée aux rencontres proches⁸ des petits astéroïdes avec les corps massifs (1) Cérès, (2) Pallas et (4) Vesta, en particulier à la distribution des vitesses relatives de rencontres proches. Celle-ci est donnée figure 4.4.

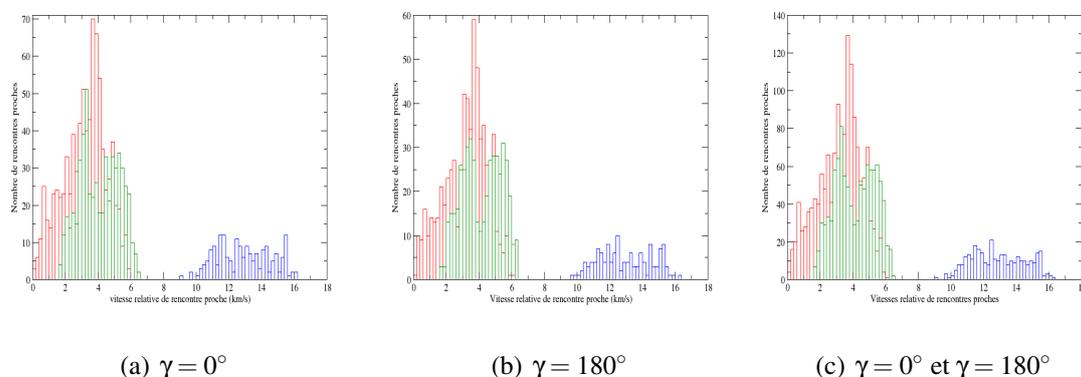


FIG. 4.4: Nombre de rencontres proches des petits astéroïdes en fonctions des vitesses relatives. En rouge : rencontres proches avec Vesta, en vert avec Cérès, en bleu avec Pallas.

Pour les 330 astéroïdes membres de la famille Vesta (dans les deux cas $\gamma = 0^\circ$ et $\gamma = 180^\circ$), j'ai dénombré 3206 rencontres proches au total sur 10 millions d'années. 52,65% de ces rencontres proches sont avec le corps parent (4) Vesta, 36,65% avec le corps (1) Cérès et 10,69% avec l'astéroïde de haute inclinaison (4) Pallas. Ceci est en accord avec les résultats donnés dans [Delisle and Laskar, 2012] qui tout en ayant inclus onze astéroïdes massifs, donne sur 30 millions d'années 36,55% des rencontres proches avec Cérès et 63,63% avec Vesta.

⁷Par manque de ressources de calculs seul les perturbations planétaires ont été prises en compte et aucun petit corps massif n'a été introduit.

⁸Je considère qu'il y a une rencontre proche lorsque la distance entre le petit astéroïde et l'astéroïde massif est inférieure ou égale à la distance au rayon de Hill du corps massif.

Les rencontres proches avec Pallas se font à de grandes vitesses (au moins 10km/s) alors qu'elles se font à de faibles vitesses avec Vesta et Cérès se sont donc elles qui peuvent être à l'origine de diffusions.

La distribution globale des vitesses de rencontres proches avec Cérès et Vesta (respectivement en vert et en rouge Fig. 4.4(c)) sont en accord avec les résultats analytiques que j'avais obtenus lors de mon stage de Master 1 [Souami, 2007]⁹ (Fig. 4.5).

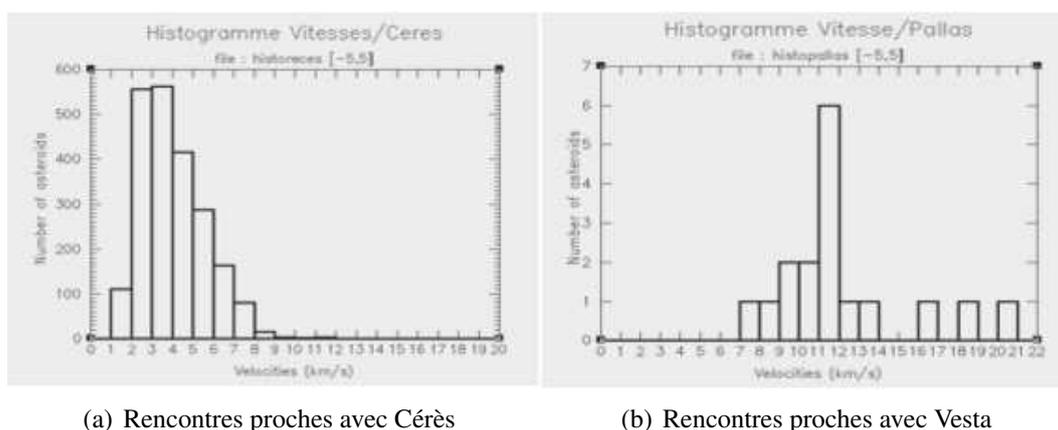


FIG. 4.5: Nombre de rencontres proches des petits astéroïdes en fonctions des vitesses relatives. Rencontres proches avec Cérès et Vesta avec des astéroïdes dans leur région respectives délimités par des inclinaisons de $\pm 5^\circ$.

4.3 Conclusions et perspectives

Je me suis intéressée à l'évolution dynamiques des petits membres de la famille Vesta, ces astéroïdes étant les plus sensibles à l'effet Yarkowsky. J'ai déterminé la valeur maximale de la dérive en demi-grand due à l'effet Yarkowsky et retrouve bien le comportement cette dérive fonction du demi-grand axe pour les matériaux basaltiques.

Nous prévoyons (avec le même groupe qui participe à l'étude de la famille Vesta), l'étude de populations fictives en résonances 3:1 et ν_6 celles-ci étant probablement à l'origine de populations NEAs de type-V.

Je me suis également intéressée¹⁰ à l'étude de la famille de l'astéroïde (2) Pallas, astéroïde de type B [Bus and Binzel, 2002] et dont la composition demeure à ce jour inconnu. Très peu d'études sont effectuées sur les populations de la ceinture principale à haute inclinaisons. V. Carruba et ses collaborateurs [Carruba et al., 2012a] se sont récemment intéressés aux problèmes de diffusions des populations de hautes inclinaisons (populations dans la région de Pallas) conséquences de rencontres proches successives avec des astéroïdes massifs¹¹.

⁹Tous les événements de rencontres proches étaient considérés équiprobables.

¹⁰à titre personnel en dehors du contexte de la thèse

¹¹http://goldenage2012.ifac.cnr.it/goldenage2012/presentazioni/Carruba-Lincei_2012.pdf

Dans mon étude effectuée sur 20 millions d'années (Les effets gravitationnels des planètes et des trois¹² petits corps massifs sont considérés à savoir Cérès, Pallas et Vesta ; les effets relativistes le sont également.). Il ressort des résultats préliminaires de cette étude que les rencontres proches avec Cérès et Vesta dominent tout comme elle dominaient dans le cas de la famille Vesta.

Dans le cas des 93 membres de la famille Pallas¹³ dont j'ai propagé les orbites dans la configuration sus-citée, un total de 390 rencontres proches avec les petits corps massifs ont été enregistrées. 34,35% d'entres elles avec (4) Vesta, 47,18% avec (1) Cérès et seulement 18,46% avec le corps parent (2) Pallas.

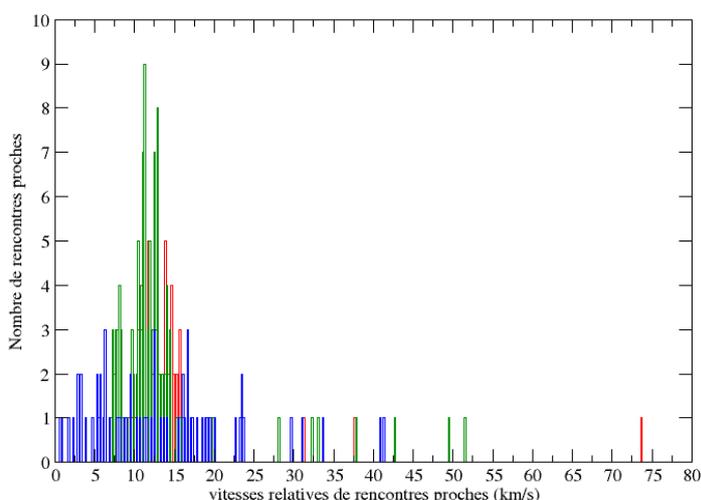


FIG. 4.6: Nombre de rencontres proches des astéroïdes de la famille Pallas en fonctions des vitesses relatives. En rouge : rencontres proches avec Vesta, en vert avec Cérès, en bleu avec Pallas.

La figure 4.6 montre le nombre de rencontres proches des astéroïdes de la famille Pallas (avec les trois petits corps massifs) en fonctions des vitesses relatives. Les rencontres proches de (relativement) petites vitesses sont essentiellement avec le corps parent Pallas. Il est donc plus susceptible d'être à l'origine d'importante diffusion que les deux autres, tout le contraire de la famille Vesta.

Les résultats préliminaires de l'étude de Carruba et son équipe, à savoir le rôle indéniable des rencontres proches avec (2) Pallas, (10) Hygiea et (31) Euphrosyne dans l'évolution de la famille Pallas, les amènent à se poser les questions suivantes : "combien d'astéroïdes, même peu massifs jouent un rôle indéniable dans l'évolution dynamiques des populations à leurs voisinages ? Combien d'astéroïdes de hautes inclinaisons (malheureusement très peu, à mon avis) jouent un rôle primordial dans la diffusion des populations de la ceinture principale ?"

¹²faute de disponibilité de ressources informatiques.

¹³Nesvorny, D., Nesvorny HCM Asteroid Families V2.0. EAR-A-VARGBDET-5-NESVORNYFAM-V2.0. NASA Planetary Data System, 2012.

Deuxième partie

Analyse des données observationnelles du SUBARU

CHAPITRE 5

TRAITEMENT DES DONNÉES DU TÉLESCOPE SUBARU : GÉNÉRALITÉS

5.1 Le télescope SUBARU

Situé au sommet du Mauna Kea, volcan dormant de l'île d'Hawaii ($19^{\circ}49'43''$ N, $155^{\circ}28'50''$ W, 4 139 m), le télescope japonais SUBARU jouit de conditions d'observations exceptionnelles. La pression atmosphérique y est d'environ 60 mbar, soit $\frac{2}{3}$ de la pression au niveau zéro. De plus, le sommet isolé est protégé par une couche d'inversion atmosphérique qui contraint les nuages à se former plus bas. Le taux d'humidité moyen est d'environ 40% avec un vent moyen de 7 m/s soit 25 km/h, et l'on estime à 240 le nombre de nuits claires par an. Enfin, la situation géographique de l'archipel d'Hawaii, en plein milieu de l'océan Pacifique, à plus de 3.800 km de la côte ouest des États-Unis d'Amérique et à 6.000 km du Japon, favorise les observations du fait d'une faible pollution.



FIG. 5.1: Le SUBARU télescope (Siegfried Ettl).

Toutes ces conditions réunies font du sommet de Mauna Kea un site privilégié sur lequel ont été installés treize télescopes appartenant à onze pays.

La construction du SUBARU débuta en juin 1992. Fonctionnel depuis janvier 1999, il est géré par l'Observatoire Astronomique National du Japon (NAOJ). Ce télescope de type Cassegrain

disposant d'un miroir primaire de 8,2m de diamètre est utilisé pour des observations dans les domaines du visible et de l'infrarouge. Divers instruments peuvent être montés au foyer du télescope parmi lesquels sept instruments appartenant à SUBARU, ainsi que certains instruments extérieurs.

Les instruments SUBARU utilisés à des fins d'imagerie et de spectroscopie sont décrits ci-dessous :

- **COMICS (Cooled Mid-Infrared Camera and Spectrometer)** : installé au foyer du télescope, il couvre un champ de $42'' \times 32''$. Constitué de six détecteurs (Arsenic-doped silicon) Si :As BIB 320×240 , il est utilisé à des fins d'imagerie et de spectroscopie (7,5-13,5 μ). L'échelle est de $0''.133/\text{pixel}$ et 15 filtres sont disponibles.
- **FOCAS (Faint Object Camera And Spectrograph)** : il couvre un champ circulaire de $6'$ de diamètre avec pour principe la réfraction optique (hors service depuis février 2012) ; optimisé pour les longueurs d'ondes comprises entre 3.700 et 10.000 Å.
- **IRCS (Infrared Camera and Spectrograph)** : il est composé de deux matrices disjointes ALADDIN III 1024^2 Insb pixel^2 : la première pour la caméra, la seconde pour le spectrographe avec une taille moyenne de pixel correspondant à 27 *mas*. Par exemple, pour la caméra il existe trois modes de résolution : 1- Bonne résolution, avec un Champ¹ = $12''.22^2$ pour une échelle de $11,94 \pm 0,01 \text{ mas}$; 2- Haute résolution, FOV = $21''.06^2$ pour une échelle de $20,57 \pm 0,04 \text{ mas}$; 2- Basse résolution FOV = $54''.04^2$ pour une échelle de $52,77 \pm 0,04 \text{ mas}$.
- **MOIRCS (Multi-Object InfraRed Camera and Spectrograph)** : avec un FOV = $4' \times 7'$ couvert par deux matrices Hawaii-2 2.048×2.048 , permettant ainsi une résolution spatiale de 117*mas*/pixel. Il permet une analyse spectroscopique d'une quarantaine d'objets simultanément, dans la bande 0,9 – 2,5 μ .
- **Suprime-Cam (The Subaru Prime Focus Camera)** : les données présentées ici, et traitées dans le chapitre 6, ont été acquises à l'aide de cet instrument. Je reviendrai sur les caractéristiques de cette caméra ultérieurement (Sect. 5.2).
- **HDS (High Dispersion Spectrograph)** : destiné à des fins spectroscopiques dans la bande (3.000 – 10.000) Å, avec une résolution spatiale de 13,5 μ/pixel .
- **FMOS (Fiber Multi Object Spectrograph)** : il est composé de 400 fibres couvrant un FOV = $30'$ de diamètre avec une rms de 0,2 arcsec. Deux spectrographes sont connectés à ces fibres, ils couvrent le spectre 0,9 – 1,8 μ .
- **HiCIAO (Coronagraphic Imager for Adaptive Optics)** : conçu pour la détection des objets fins mais aussi des objets brillants (avec utilisation de filtres), il est également utilisé pour l'imagerie de haute-résolution dans l'infrarouge proche. Deux résolutions spectrales sont proposées : 12 *mas*/pixel et 22 *mas*/pixel. Il est constitué d'un détecteur de type ALADDIN II 1.024^2 InSb, qui couvre un FOV de $11''.8$ ou $21''.8$.

Des technologies d'optique adaptative (AO188 et AO36) sont également disponibles, et peuvent être montées au foyer avec les coronographes ou spectrographes.

La figure 5.2 montre la résolution optique en fonction de la longueur d'onde pour chaque instrument.

Les données présentées dans ce chapitre et traitées dans le chapitre 6, ont été obtenues à l'aide

¹Dans ce qui suit, je noterai le champ d'une caméra FOV : Field of View.

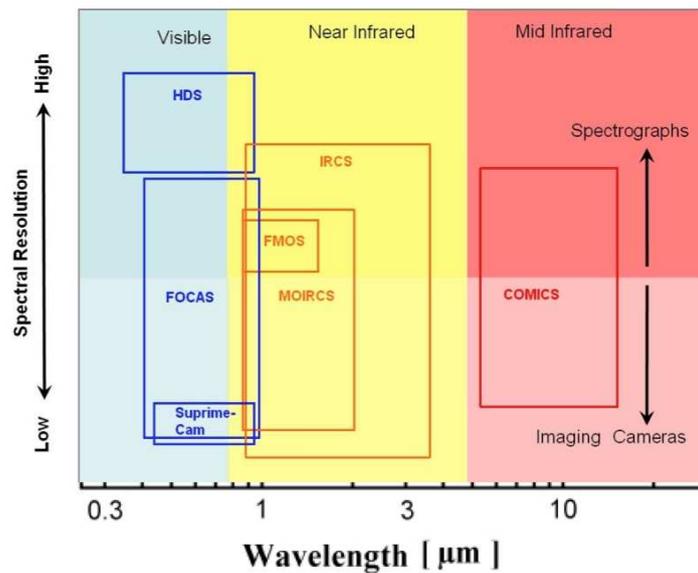


FIG. 5.2: Résolution optique des divers instruments du SUBARU en fonction de la longueur d'onde (<http://www.naoj.org/>).

de la caméra Suprime-Cam au foyer du télescope SUBARU.

5.2 Présentation de l'instrument

Dans ce qui suit, j'analyse des images obtenues à l'aide de l'instrument Suprime-Cam [Miyazaki et al., 2002]. Cette caméra de 80 méga pixels (10.240×8.192), dédiée aux observations dans le visible, possède une résolution de $0''.202/\text{pixel}$.

Elle consiste en une mosaïque de dix détecteurs CCD² développés au MIT Lincoln Laboratory [Miyazaki et al., 2002], montés en 5×2 (Fig. 5.4), recouvrant ainsi un champ large de $34' \times 27'$. Elle est aussi équipée d'une bonnette (une sorte de juke-box) sur laquelle peuvent être montés dix filtres simultanément. Une vue schématique de l'instrument est présentée (Figure 5.3³).

5.2.1 Configuration de la mosaïque

Dix pavés (Chips) constituent la mosaïque de la caméra. Ils sont dans une configuration 5×2 (Fig. 5.4). Des lacunes horizontales et verticales de $16''$ et $3''$ (projetées sur le ciel) séparent les pavés.

La taille de chaque CCD en pixels est de 2.048×4.096 , pour une surface effective de 2.046×4.090 . La disposition des dix pavés, numérotés de 0 à 9, est présentée Fig. 5.4.

Bien qu'ils aient tous été fabriqués au MIT Lincoln Laboratory [Miyazaki et al., 2002], les pavés CCDs n'ont pas tous la même sensibilité. Ce facteur est à prendre en considération lors des

²Charge-Coupled Device, en français Dispositif à Transfert de Charges

³avec l'autorisation de Satoshi Miyazaki (NAOJ), email du 27 juillet 2012 (UT).

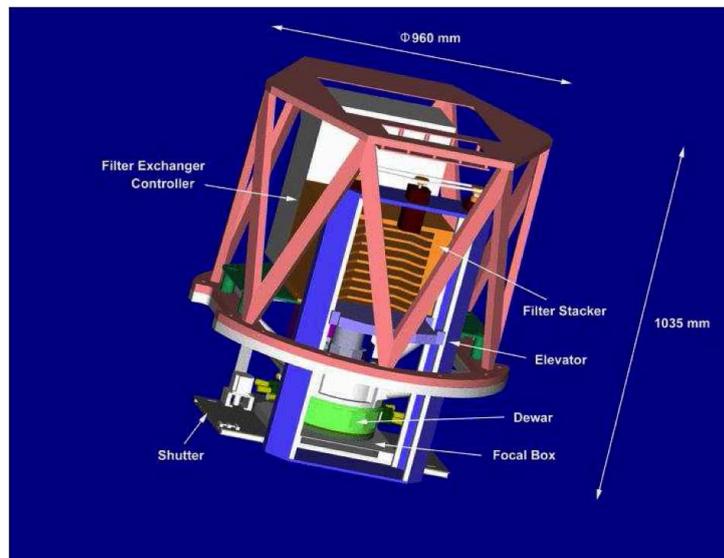


FIG. 5.3: Vue schématique de l'instrument Suprime-Cam (Miyazaki)

mesures de flux et du calcul des magnitudes si des étoiles de références ne sont pas disponibles dans le champ.

5.3 Données et survey SMBAS

Lors du XXIXe Symposium de Mécanique Céleste (Tokyo, 29-30 janvier 1996), [Nakamura, 1997] propose l'utilisation de grands télescopes type SUBARU (8-10 m) pour l'observation des astéroïdes sub-kilométriques. Suite à cette proposition, des observations ont été effectuées depuis février 2001 dans le cadre du SMBAS (Sub-km Main-Belt Asteroids Survey ou encore SUBARU Main-Belt Asteroids Survey) [Yoshida et al., 2001], [Yoshida et al., 2003], [Yoshida and Nakamura, 2004], [Yoshida and Nakamura, 2005], [Yoshida and Nakamura, 2007].

Comme nous avons pu le montrer dans les chapitres précédents, nous ne disposons que de très peu de données sur les petits astéroïdes, en particulier les astéroïdes sub-kilométriques. L'utilisation de grands télescopes et des caméras à champ large, telle que la Suprime-Cam [Nakamura, 1997], permet de fournir des informations sur la classification taxonomique de ces objets, leur distribution en taille, ainsi que leur rotation à l'aide des courbes de lumières obtenues. La cible principale sera la ceinture principale d'astéroïdes [Yoshida et al., 2003], [Yoshida and Nakamura, 2004], [Yoshida and Nakamura, 2007], [Dermawan et al., 2011], ainsi que les Troyens (autour des points Lagrange L_4 et L_5 de Jupiter) [Yoshida and Nakamura, 2005].

Aux observations SMBAS-I (22 et 25 février 2001 (UT)) et SMBAS-II (21 octobre 2001 (UT)) viennent se rajouter celles de SMBAS-III présentées dans ce chapitre. Les résultats préliminaires de ce dernier survey (SMBAS-III) ont été présentés à l'ACM en mai 2012 à Niigata (en session de poster) [Souami et al., 2012d].

Ces observations, sur les deux nuits du 2 et 3 septembre 2002, ont été effectuées dans les deux

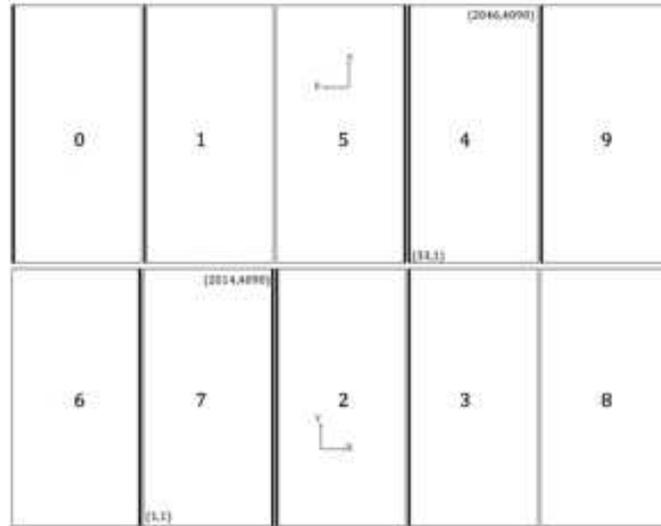


FIG. 5.4: Configuration de la mosaïque CCD : les zones grisées correspondent aux zones mortes d'overscan.

bandes B et R, respectivement de longueurs d'onde effectives 4.478 \AA et 6.550 \AA [Miyazaki et al., 2002]. Deux champs ont été observés durant ces deux nuits, ils seront notés FIELDA pour la première nuit et FIELDB pour la seconde. Les champs ciblés sont proches de l'écliptique.

Le champ FIELDA est centré en ascension droite $\alpha = 22:41:38.179$, déclinaison $\delta = -07:37:35.32$ avec un temps total d'exposition de 08h29m45.675s. Le champ FIELDB quant à lui, est centré en $\alpha = 22:41:30.211$, $\delta = -09:17:52.73$ pour un temps total d'exposition de 08h16m19.695s. Les informations relatives à ces observations (champs ciblés, filtre, masse d'air à la première pause ainsi que la masse d'air moyenne sur la totalité du temps d'observation ...) sont données Table 5.1.

Champ	α	δ	FILTRE	Temps. début obs. (UT)	Airmass	Airmass moyen
FIELDA	22:41:38.179	-07:37:35.32	R	06:37:37.639	2.0240	1.49447
FIELDA	22:41:38.179	-07:37:35.32	B	06:24:11.342	2.2280	1.80878
FIELDB	22:41:30.211	-09:17:52.73	R	07:57:22.174	1.3930	1.55611
FIELDB	22:41:30.211	-09:17:52.73	B	10:03:30.229	1.1450	1.30250

TAB. 5.1: Les champs observés.

Tout comme pour les précédents surveys, le temps d'exposition pour chaque pause est de 120s. Ceci résulte du fait que :

- la vitesse de suivi du télescope est égale à la vitesse sidérale de la Terre,
- les objets à la limite extérieure de la ceinture principale (3,5 au) ont une vitesse de 0,46 arcsec/minute,
- le seeing au sommet du Mauna Kea est de 0,9 arcsec.

Un temps d'exposition plus élevé induirait l'observation de traînées et la non résolution des objets.

TAB. 5.2: Temps d'intégration par CCD pour le champ FIELDA.

CCD	images correspondantes	nbre d'images	temps total d'intégration	α	δ
0	Table D.1	134	08:29:45.675	22:42:35.6184	-07:30:39.3102
1	Table D.2	155	08:26:48.664	22:42:07.2672	-07:30:37.4861
2	Table D.3	152	08:24:45.675	22:41:38.4480	-07:44:20.4018
3	Table D.4	144	08:24:45.675	22:41:09.9984	-07:44:20.5440
4	Table D.5	148	08:00:33.718	22:41:10.1520	-07:30:42.8616
5	Table D.6	146	08:21:51.970	22:41:38.9184	-07:30:43.3375
6	Table D.7	152	08:29:45.675	22:42:35.5920	-07:44:21.2132
7	Table D.8	152	08:29:45.675	22:42:07.3536	-07:44:20.9400
8	Table D.9	148	08:29:45.675	22:40:42.3312	-07:44:17.7749
9	Table D.10	156	08:27:45.992	22:40:41.9304	-07:30:44.3142

Les données présentées dans ce chapitre et utilisées dans le suivant sont issues de la base de données SMOKA (Subaru-Mitaka-Okayama-Kiso-Archive). Celle-ci est opérée par l'Observatoire Astronomique National du Japon (NAOJ).⁴

Dans la bande R, nous disposons de 1.476 images pour la première nuit et 1.228 images pour la seconde. Dans la bande B, nous avons 90 images pour la première nuit et 60 images pour la seconde. De plus, notons que le champ de la seconde nuit est à l'est de celui de la première, ce qui permettra des détections uniques d'objets.

Dans la table [5.2](#), je donne pour chaque pavé de la première nuit : le nombre d'images utilisées, le numéro de tableau dans l'annexe ([D](#)) où sont listées toutes ces images⁵, le temps d'intégration total correspondant, ainsi que le centre du champ (α, δ) couvert par le pavé.

5.4 Traitement des données

Les données sont fournies au format FITS (Flexible Image Transport System) [[Hanisch et al., 2001](#)] conventionnel. Ces images (*.fits*) sont de types *objet*, *flat* ou *bias*. Les images étant numériques, elles transmettent donc du bruit en plus des signaux d'information. Par signaux d'informations, on entend ceux provenant de l'étoile ou de l'astéroïde observé, et par bruit ceux provenant des variations du signal liées aux variations des conditions atmosphériques (information retrouvée dans la masse d'air). Le signal reçu est également très sensible à l'électronique des instruments. Comme expliqué plus haut, même si les CCDs sont tous développés au même endroit (MIT), ils n'ont pas tous la même sensibilité, ce qui aura pour conséquence la détection d'un signal brut légèrement différent d'un pavé à l'autre.

Lors de l'acquisition des images, les photons tombent sur les capteurs CCD et des électrons sont produits par effet photoélectrique. Pour chaque pixel constituant notre CCD, le signal de

⁴Mention légale : This work is based on data collected at Subaru Telescope and obtained from the SMOKA, which is operated by the Astronomy Data Center, National Astronomical Observatory of Japan [[Baba et al., 2002](#)].

⁵Les noms des images correspondent aux fichiers tels qu'ils sont nommés dans la base de données SMOKA <http://smoka.nao.ac.jp/>.

sortie sera fonction linéaire du flux reçu [Arnaudet, 2002]. L'image en sortie (image brute), dite *objet* plus haut, s'écrit comme suit :

$$S = I.PLU + Dark \quad (5.1)$$

où I correspond à l'image traduisant l'information réelle reçue par les capteurs CCD. Elle est l'image obtenue à l'issue du prétraitement.

Les images "PLU" (Plage de Lumière Uniforme), plus communément connues sous le nom de FLAT, sont réalisées lors de l'acquisition d'une image d'un écran éclairé de manière uniforme. Leur acquisition est nécessaire pour pouvoir corriger les effets dus au vignetage ("l'image est assombrie dans les coins lorsque le cône de lumière est inférieur à la taille du capteur CCD.") et aux poussières qui pourraient se trouver entre l'optique et le capteur [Outters, 2006]. Elles nous permettent de créer une carte de notre CCD, et de connaître la réponse de chaque capteur pour une même source uniforme. Le temps d'exposition est le même que pour les images objets.

Les images "BIAS", connues également sous le nom d'OFFSETS, sont en théorie acquises avec un temps d'exposition de zéro milliseconde. Elles nous permettent de construire une carte des charges (pré-charges) accumulées par les capteurs. Ces effets sont liés à l'électronique des capteurs.

Les images "DARK" portent bien leur nom. Elles consistent en des images prises dans le noir, obturateur fermé, avec le même temps de pose que pour les images objets. Tout comme pour les images BIAS, les pixels n'ont pas tous la valeur zéro, et les CCDs génèrent des pré-charges qui varient dans le temps.

Le prétraitement consiste donc à reconstituer l'image reçue par les capteurs (image I dans l'équation 5.1) en s'affranchissant des divers parasites, liés à l'électronique ...

5.4.1 Prétraitement des images

Le prétraitement est fait de manière classique, en utilisant le programme SDFRED1 [Yagi et al., 2002], [Ouchi et al., 2004] fourni par SMOKA, ou en utilisant les procédures et routines standards IRAF destinées à cet effet [Yoshida et al., 2003], [Yoshida and Nakamura, 2007]. Il est réalisé dans le but de reconstituer l'image I (Eq. 5.1). Dans tout ce qui suit, les étapes décrites devront être réalisées pavé par pavé pour chacune des deux nuits.

Une image MASTER BIAS, moyenne des régions de recouvrement (overscan), est créée. Cette image est soustraite à toutes les images dites de type objet. Les images sont alors débiaisées. Elles seront tronquées des pixels correspondants à la zone de recouvrement, les images *.fits* ne seront plus de taille 2.048×4.096 mais de 2.046×4.090 en pixels.

Il faudra ensuite créer une image MASTER FLAT qui n'est rien d'autre que la médiane des images de type FLAT. Toujours pavé par pavé, les images débiaisées obtenues seront à leur tour divisées une à une par l'image MASTER FLAT pour produire une image prétraitée (débiaisée et "déflatée") et scientifiquement exploitable.

5.4.2 Détection des astéroïdes

La détection des astéroïdes est sans aucun doute la tâche la plus prenante, amusante et laborieuse. Pour ce faire, j’ai utilisé deux méthodes. J’expliquerai ici les deux méthodes et exposerai les avantages et les inconvénients de chacune d’entre elles [Souami et al., 2012c] (Annexe D).

Méthode de détection à l’œil :

Cette méthode a été introduite de manière indépendante d’une part par [Yoshida et al., 2001] dans le cadre du traitement des données SMBAS-I, et d’autre part par [Millis et al., 2002] pour la recherche d’objets de la ceinture de Kuiper et de Centaures sur des données du Télescope Mayall de 4m au Kitt Peak National Observatory en Arizona. Depuis, cette technique a été utilisée pour le traitement de toutes les données SMBAS [Yoshida et al., 2003] et [Yoshida and Nakamura, 2007].

La méthode consiste à additionner et empiler (stack) des images trois par trois (pour détecter les objets dans la bande B) ou cinq par cinq (dans la bande R) et à repérer les objets en mouvement. À titre d’exemple, on pourra voir (Fig. 5.5) l’image résultante de la combinaison de trois images, deux images en R et une en B. On notera, R_x la $x^{\text{ème}}$ image dans la bande R. L’image (Fig. 5.5) (de 60×100 , en pixels), sur laquelle apparaissent deux taches lumineuses (images R) et une tache sombre (image B), est obtenue de la manière suivante :

$$c_1 R_1 - B + c_2 R_2 \tag{5.2}$$

Les coefficients c_x sont introduits pour ajuster le niveau du ciel d’une image à l’autre. Ils sont définis comme étant la différence entre la valeur moyenne des pixels de l’image R_x et de cette même quantité pour l’image B. Ici, l’image R_1 a été acquise 120s avant l’image B, et l’image R_2 120s après l’image B.

Les positions des astéroïdes (en pixels) sont alors extraites à la main, dans un fichier *.reg* (region file) en utilisant le logiciel DS9 [Joye and Mandel, 2003], et retranscrites dans un fichier pour chaque pavé. La démarche est la même pour les images dans la bande R.

La détection des astéroïdes par cette méthode est très longue. Cependant, elle présente l’avantage de donner le temps d’explorer l’image résultante, contrairement à la détection par des clignements (blinks).

Bien que fournissant des résultats remarquables, cette méthode ne peut pas faire face aux progrès permanents en matière de Caméra CCD. En effet, il est prévu de remplacer dès l’an prochain la caméra Suprime-Cam du SUBARU télescope, qui a servi à l’acquisition des données présentées dans ce chapitre, par une caméra de champ environ dix fois plus large [Kamata et al., 2010] ($1^\circ.8 \times 1^\circ.8$). Le FOV sera couvert par 116 pavés de $2k \times 4k$, et par conséquent, il est unimaginable de traiter cela l’œil nu. Une détection automatique s’avère nécessaire. La seconde méthode que je présente ici est une méthode automatique.

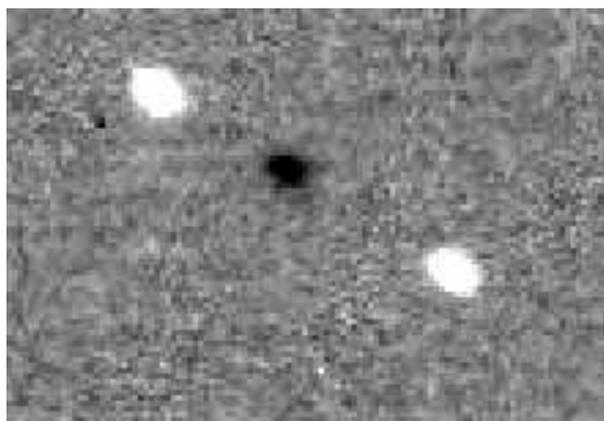


FIG. 5.5: Image obtenue en combinant 3 images (R-B-R). Les deux points brillants correspondent à la position de l'astéroïde dans les images R, et le point sombre à celle de l'astéroïde sur l'image B (champ de $12'' .12 \times 20'' .20$).

Méthode de détection numérique :

Devant les progrès vertigineux en matière de CCD et de caméras, il devient indispensable d'avoir des logiciels de détection automatique fiables. Il existe plusieurs programmes informatiques et logiciels pour la détection d'astéroïdes. Ils sont utilisés notamment pour les grands surveys (tels que SDSS, LINEAR ...). En ce qui concerne le survey SMBAS, un logiciel de ce genre a été utilisé en 2006 par Budi Dermawan dans sa thèse. Il s'est cependant avéré être moins performant que la méthode décrite plus haut (Sect. 5.4.2). Néanmoins il a permis la détection d'objets ayant pour limite supérieure une magnitude de 21⁶.

J'utiliserai ici un programme initialement écrit en Fortran 77 par Jay Anderson lors de son séjour au SYRTE en août 2011. J'ai adapté ce code en Fortran 90 (plus compréhensible pour moi) compilable en Lahey Fortran, ce qui me permettra de gagner 30% en temps CPU⁷.

L'écriture de ce programme est basée sur la méthode exposée plus haut [Souami et al., 2012c] et présentée dans [Yoshida et al., 2001]. Je prendrai le temps ici de développer certains points. Les images peuvent être introduites, prétraitées ou brutes, et il suffira de changer un paramètre en entrée pour préciser la nature des images utilisées.

Ainsi, le programme commence par l'identification des étoiles non saturées, en lisant les images⁸ une par une, pixel par pixel. Une fois les étoiles identifiées, leurs positions sur chaque image ainsi que les flux correspondants sont enregistrés. Un modèle de PSF (Point-Spread Function) basé sur le profil gaussien 2-D des étoiles observées est créé.

Les étoiles identifiées seront extraites de chaque image, en utilisant pour chacune d'entre elles

⁶Les droits sur ce logiciel ont été depuis transférés à une société AstroArts Inc., qui en a fait un programme interactif "Stellar Hunter Professional". Malheureusement, il n'est disponible qu'en version japonaise.

⁷Tout gain en temps CPU est plus que bienvenu du fait du manque de ressources informatiques. Faire tourner le programme sur une nuit de données, comme explicité ici, nécessite douze jours de calculs. En adaptant le programme au compilateur lhay fortran, le temps de calcul est réduit à environ 8,5 jours. De plus, la parallélisation du programme conduit à une réduction considérable en temps CPU, qui atteint environ vingt et une heures si j'utilise dix cœurs de calculs.

⁸Dans tout ce qui suit, le terme *image* signifie *image de type objet*, prétraitées.

le modèle de PSF pré-établi et le flux moyen calculé. Un modèle du ciel est lui aussi soustrait à chaque image. Pour identifier les astéroïdes potentiels, les images résultantes sont alors convoluées avec un noyau 5×3 (taille typique des astéroïdes recherchés), de manière à mettre en valeur les détections (voir Annexe [D.2](#)).

Une liste des détections pas trop proches des étoiles et avec une valeur significative (supérieure au seuil de saturation) de DN (Digital Number), est alors établie. Nous additionnons maintenant les images afin de visualiser les traînées résultantes des mouvements d'astéroïdes.

Nous pouvons maintenant mesurer ces traînées et calculer les vitesses des objets en pixels/s suivant les deux directions x et y .

Ayant passé beaucoup de temps à analyser ces deux méthodes de détection, il m'a paru nécessaire de leur consacrer ce chapitre. Dans le prochain chapitre, je décrirai l'application de ces méthodes au champ FIELDA et comparerai les résultats obtenus.

CHAPITRE 6

TRAITEMENT DES DONNÉES DU SUBARU TÉLESCOPE : APPLICATIONS

Le traitement des données SUBARU obtenues dans le cadre du survey SMBAS-III présenté dans le chapitre précédent va permettre plusieurs études qui feront l'objet de diverses publications dans les mois à venir. Dans un premier article [Souami et al., 2012c]¹, nous avons présenté les méthodes qui sont utilisées dans la suite pour le traitement de ces données. Ce chapitre est consacré entre autre à l'application des méthodes de détections décrites dans le chapitre 5.

La richesse des résultats obtenus par observation d'un seul champ par nuit nous permet, en plus de la détection des astéroïdes, d'estimer leurs éléments orbitaux (a,i) et de définir ainsi un plan orbital préliminaire.

L'observation dans la bande R plus de 90% du temps, nous permet pour quelques astéroïdes d'obtenir des courbes de lumière, dont nous déduisons les périodes de rotation. De plus, l'observation dans les deux bandes R et B nous permet une classification taxonomique grossière. Si la différence des magnitudes B-R est inférieure à 1,1, l'astéroïde est de classe D ou S, alors que si B-R est supérieur à 1,1, l'astéroïde est de type C ou M.

J'ai tenu à séparer la partie d'analyse des résultats de la présentation des méthodes (Chapitre 5). En effet, le développement des méthodes utilisées à ce jour est aussi important que l'analyse des résultats.

L'an prochain, le remplacement de la Caméra Suprime-Cam, utilisée pour l'acquisition des données traitées ici, par une caméra d'un champ dix fois plus grand [Kamata et al., 2010] va contraindre d'automatiser les méthodes de traitement. Il apparaissait donc évident de consacrer un chapitre à l'identification des lacunes éventuelles par souci d'optimisation de la détection.

Les résultats présentés dans ce chapitre doivent être considérés comme des résultats d'applications directes afin de tester les programmes, et non comme les résultats définitifs du traitement des données SMBAS-III.

¹soumis dans le cadre des proceedings qui font suite à la conférence ACM, qui s'est déroulée en mai dernier à Niigata, Japon.

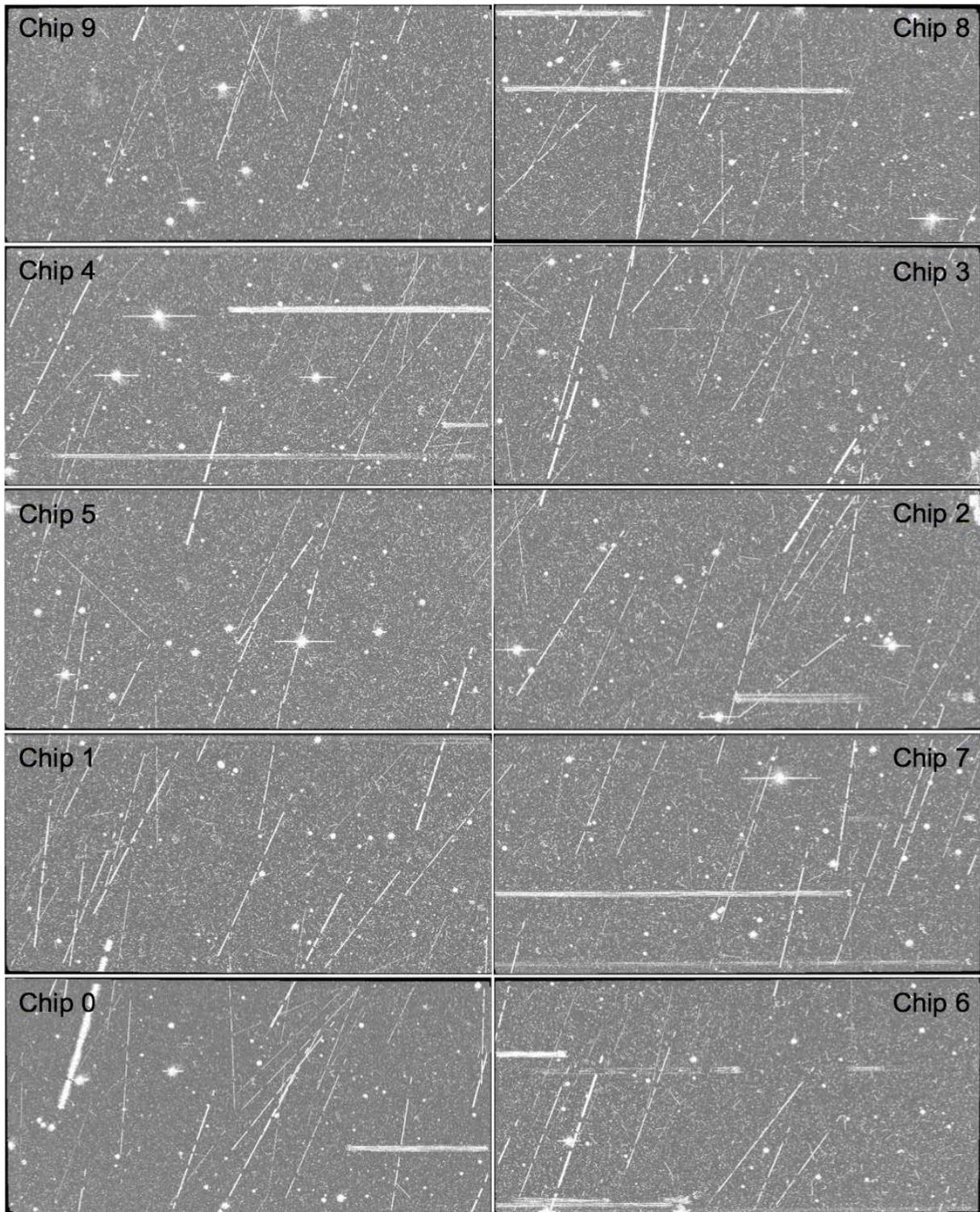


FIG. 6.1: Reconstitution de la mosaïque CCD pour la nuit du 02/09/2002.

6.1 Application des méthodes de détections au Champ FIELDA

Dans [Souami et al., 2012c], nous avons utilisé les deux méthodes explicitées (Sect. 5.4.2). Avec la première méthode (méthode de détection à l'œil), nous avons détecté 189 astéroïdes. La figure 6.1, est une reconstitution de la mosaïque (un empilement) sur laquelle les traînées indiquent le parcours des astéroïdes durant toute la nuit d'observation.

6.1.1 Application de la méthode automatique

Comme explicité dans la section 5.4, l'analyse se fait pavé par pavé. Nous disposons en moyenne de 140 images par pavé, et la détection se fait grâce à un produit de convolution qui permet de mettre en valeur certains objets faibles (cf. Annexe D.2.2). Cette méthode peut parfois engendrer la dégradation du rapport signal sur bruit SNR (*Signal-to-Noise Ratio*), ce qui peut donner lieu à de fausses détections ou au réhaussement du signal dû au rayons cosmiques ... Ceci impose une contrainte supplémentaire pour l'utilisation de notre programme. En effet, je suis arrivée à la conclusion suivante après plusieurs tests : au-delà de 55 images, il est impossible pour le programme d'identifier les traînées, conséquence de la dégradation du SNR.

Le nombre de 55 images nous paraît être une limite supérieure. Ce nombre est bien sûr lié au *seeing* et à la qualité des images. Pour la première nuit avec une masse d'air moyenne en R de 1,49447 (Tableau 5.1), ce nombre de 55 n'est pas optimal.

La figure 6.2 présente un exemple d'une image compilée (*stack*) obtenue par la présente méthode. Nous voyons bien qu'en plus des traînées dues au mouvement de l'astéroïde, du bruit est également réhaussé.

Il aura fallu plusieurs tests pour déterminer le nombre optimal d'images à utiliser pour la création de chaque compilation (*stack*) et pour la détection des astéroïdes. Je me suis arrêtée au nombre de 35 images car, au-delà, l'image compilée devient illisible et l'on ne peut pas détecter les traînées.

Disposant d'environ 140 images par pavé et ne pouvant en utiliser plus de 35, j'ai donc automatisé la procédure de manière à créer une sorte de bande passante sur les images, et créer des *stacks* sur toutes les images de la nuit (n_{tot}) : premier *stack* (image 1 à 35), ..., $n^{\text{ème}}$ *stack* (de l'image n à l'image $n + 35 - 1$), avec $n \leq n_{tot} - 35 + 1$.

A supposer que j'ai 140 images pour le pavé 0, je dois analyser $140-35+1$ fois 35 images, je dois donc faire tourner 106 fois le programme. Paralléliser le programme devient nécessaire (cf. Annexe D.4).

Dans ce chapitre, je ne donnerai que les résultats obtenus pour la première nuit (02-09-2002), les données de la seconde nuit étant moins bonnes : mauvais *seeing*, et un satellite artificiel qui passe au milieu du champ FIELDB.

La table 6.1.1 donne pour chaque méthode le nombre de traînées détectées par pavé. Les traînées dues aux déplacements de l'astéroïde sont alors identifiées et mesurées en balayant cette dernière image pixel par pixel.

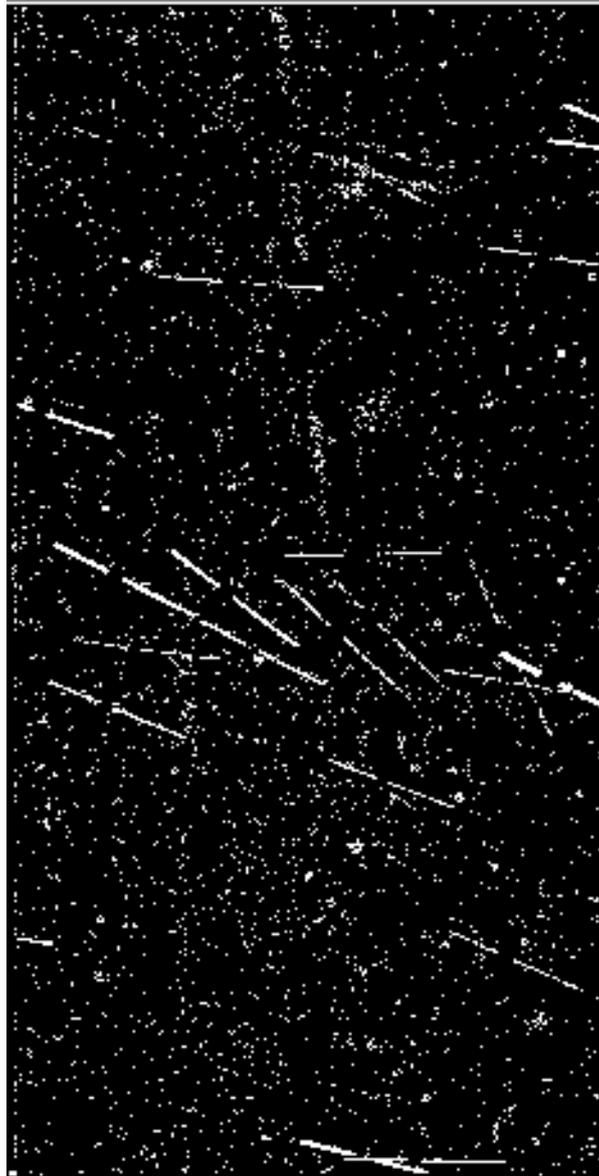


FIG. 6.2: Image stack (temps d'exposition total de 70min) obtenue à l'aide du programme de détection (pour le pavé 2 (première pause à MJD=52520.331504)).

Nous remarquerons que la méthode de détection automatique est beaucoup moins efficace que la méthode de détection à l'œil nu. En effet, contrairement aux 189 astéroïdes détectés avec cette dernière, la méthode automatique ne détecte que 84 astéroïdes. Ceci s'explique partiellement par le choix du noyau de convolution 5×3 . Ce noyau permettra seulement la détection des astéroïdes faibles de cette taille-là. Cependant, certains astéroïdes faibles échappent à la détection, et les premières investigations laissent croire à une magnitude limite aux alentours de 21,5.

Toutefois, cette méthode ne doit pas être abandonnée car dans les années à venir, nous ne pourrons plus nous permettre de détecter les objets à l'œil nu. Il est donc primordial d'améliorer le programme de détection en recherchant d'autres filtres. Si nous continuons dans la lignée

de ce programme, nous ne pourrions pas avoir des noyaux de convolution de dimension inférieure. Cependant, il serait intéressant de penser à des noyaux de convolution variables qui permettraient aussi la détection de plus gros objets. A titre d'exemple, la traînée la plus brillante de l'astéroïde qui traverse les pavés 0 et 1 (Fig. 6.1) est due à l'astéroïde (5063) Monteverdi. Membre de la famille Nysa, cet astéroïde de magnitude 15 n'est pas détecté par la méthode automatique.

N1	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Méthode à l'œil nu	29	32	23	26	26	23	18	24	21	22
Méthode numerique	18	17	12	10	17	0	10	0	0	0

TAB. 6.1: Nombre de traînées d'astéroïdes détectées pavé par pavé, par chacune des deux méthodes.

Pour en revenir aux résultats obtenus, en ce qui concerne les astéroïdes détectés par la première méthode, nous disposons de leurs positions sur chaque image. Pour ce qui est des astéroïdes détectés automatiquement, nous avons mesuré leurs vitesses en pixels/s, ainsi que leurs positions à mi-traînées.

La prochaine étape consiste à transformer en coordonnées astronomiques les positions données en pixels, et les vitesses données en pixels/s. Pour ce faire, une calibration astrométrique est indispensable.

6.1.2 Calibration astrométrique

La calibration astrométrique se fait à l'aide du *pipeline* GBOT (Ground Based Optical Tracking) [Bouquillon et al., 2012]. Il a été développé au SYRTE par Sébastien Bouquillon, dans le cadre du suivi optique au sol de la mission GAIA. La précision attendue dans l'astrométrie de GAIA est de 20 *mas* par rapport aux étoiles, ce qui correspond à 150 m pour la position de GAIA sur son orbite [Bouquillon et al., 2012].

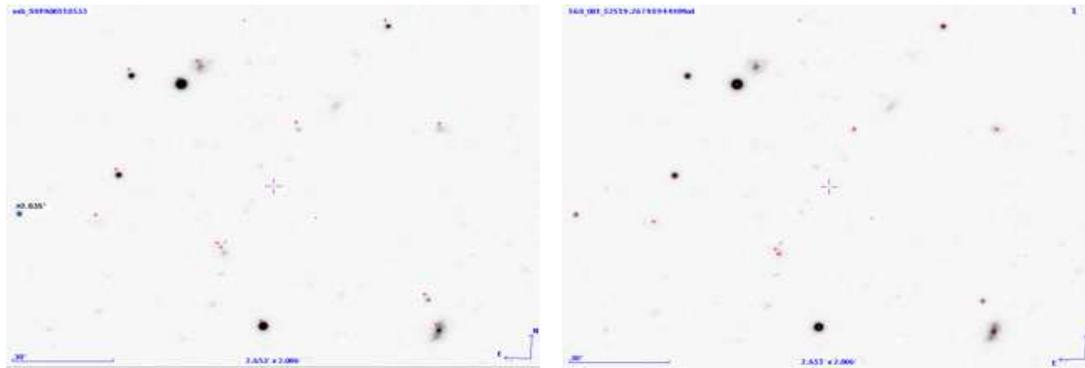
La calibration se fait de la manière suivante :

- image par image, les sources lumineuses d'une brillance significative (valeur de DN fixée en visualisant quelques images) sont détectées.
- les positions des sources identifiées sont alors extraites en pixel, ainsi que les flux correspondants.
- le catalogue astrométrique d'étoiles PPMXL [Roesser et al., 2010] est téléchargé. En utilisant l'information dans l'entête du fichier *.fits*, une cross-identification entre les sources identifiées et les sources du catalogue est alors réalisée.
- l'échelle (résolution spatiale) ainsi que les paramètres des matrices de transformation sont alors déterminés.

La résolution spatiale est 201,996 *mas/pixel*, ce qui est très proche de la valeur théorique de 202 *mas/pixel* [Miyazaki et al., 2002].

La figure 6.3 montre deux fois un champ centré en (22h41'09".79, -07°44'22".6) : sur la Fig. 6.3(a) (2'.653 × 2'.006) où l'on voit l'image SUBARU initiale non calibrée, on notera un dé-

calage entre les étoiles observées dans le champ et les étoiles du catalogue (représentées par le symbole + en rouge). L'offset atteint les $2''.835$. Pour la figure 6.3(b) ($2'.651 \times 2'.006$) après calibration, on remarquera la superposition des étoiles du catalogue à celles de notre champ. Ces figures ont été obtenues en utilisant le programme ALADIN (outil interactif de l'Observatoire Viruel (OV)) [Bonnarel et al., 2000].



(a) Image SUBARU initiale, non calibrée.

(b) Image SUBARU, après calibration astrométrique

FIG. 6.3: Exemple de calibration astrométrique à l'aide du pipeline GBOT.

6.2 Le problème de la détermination orbitale

Ce problème est l'un des tous premiers en mécanique céleste. Tout comme la question des effets dissipatifs (effet Yarkovsky), la question s'est tout d'abord posée pour les comètes (Annexe C.2). Ce problème de détermination orbitale est également un des plus simples pour lequel nous pouvons avoir une solution elle-même simple [Dubyago, 1961].

La théorie de détermination des orbites ne prendra naissance qu'après l'établissement de la théorie universelle de la gravitation par Isaac Newton (1642-1727) en 1687 (*Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*), ce qui permettra l'avènement des lois de Kepler.

La vision ancienne Aristotélicienne sur la nature des comètes a longtemps prédominé. Ainsi, pour Aristote (env -385,-322), les comètes ne sont pas des objets célestes mais des masses qui se sont évaporées de la Terre. La vision de Sénèque (env -4,65) était pourtant différente² [Dubyago, 1961].

Avec sa vision Aristotélicienne, Ptolémée (env. 90-168) ne considère pas les comètes comme des objets relevant du domaine de l'astronomie, et l'une des raisons est probablement la vision grecque du monde. Cette vision dans laquelle les comètes ne s'inscrivent pas, met en avant régularité et périodicité (Annexe A.1).

²J'ai choisi de ne pas développer ce point, car toutes les références historiques s'accordent à confirmer la vision de Sénèque pour laquelle les comètes étaient des objets célestes. Cependant, [Dubyago, 1961] en utilisant le terme "orbite" dans la vision de Sénèque perdra en crédibilité, sur le sujet, à mes yeux. Avec ma collègue historienne des Sciences Michela Malpangotto, nous avons vérifié rapidement dans une édition latine [http://books.google.fr/books?id=htgPAAAAQAAJ&pg=PT503&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false], et le terme employé était *vestigium* et non *orbita*.

La première détermination d'orbite cométaire est attribuée au danois Tycho Brahé (1546-1601). Pour ce faire, il utilisa la théorie épicyclique de Ptolémée pour essayer de déterminer une orbite géocentrique. Cependant, il est intéressant de remarquer sa conviction de la non-existence physique de ces cercles épicycliques, simple outil qui nous permet de visualiser le système et de simplifier les calculs. Il sera également intéressant de noter sa proposition de l'existence "d'orbites" non sphériques mais allongées autour du Soleil. D'autres personnes telles que Edmund Halley (1656-1742), Leonhard Euler (1707-1783), Joseph Louis Lagrange (1736-1813), Pierre Simon de Laplace ... s'intéresseront eux aussi à la détermination des orbites cométaires.

La détermination des orbites prend une autre tournure avec la découverte de Neptune par Herschel en 1781 ainsi que la découverte de Cérès par Piazzi, le 1 janvier 1801 (Chapitre 1) et la formulation d'une loi empirique sur la distribution des planètes dans le système solaire (Annexe A).

Les travaux de Carl Friedrich Gauss (1777-1855) sur la détermination des orbites ont permis de donner les éphémérides de Cérès, ce qui contribua à retrouver ce corps à partir d'un nombre limité d'observations.

Aujourd'hui encore, l'approximation au problème de deux corps sous l'influence gravitationnelle du Soleil uniquement fournit des résultats très satisfaisants pour une première estimation de l'orbite des petits corps (planètes naines et astéroïdes), ou de la comète.

Comme explicité dans [Dubyago, 1961], nous pouvons distinguer trois étapes caractéristiques de la détermination d'une orbite :

1. Détermination d'une orbite préliminaire : approximation du problème de deux corps, avec des données en général de trois ou quatre observations qui peuvent s'étaler sur quelques jours voire quelques semaines.
2. Amélioration de l'orbite préliminaire en récoltant des données observationnelles, ou en considérant les perturbations d'autres corps.
3. En revanche la détermination de l'orbite définitive, se fait en général sur des observations plus longues et en considérant au moins la perturbation des planètes.

Nous sommes ici dans un cas où nous déterminerons une orbite très préliminaire, ou plus exactement des informations sur un plan orbital. En effet, nos observations s'étalent sur quelques heures. À partir des vecteurs propres de vitesse écliptique³ ($\dot{\lambda}, \dot{\beta}$) et en supposant une excentricité nulle, on pourra déterminer un demi-grand axe a et une inclinaison i pour l'orbite de l'astéroïde ([Bowell et al., 1990], [Yoshida et al., 2001], [Yoshida and Nakamura, 2007]).

6.2.1 Détermination du vecteur propre de vitesse écliptique

Les deux méthodes de détection nous donnent les positions des astéroïdes en pixels. J'ai utilisé la routine IDL *xyad.pro* pour convertir les coordonnées sur l'image en pixel en ascension droite (α) et déclinaison (δ). La relation fondamentale entre longitudes (λ) et latitudes écliptiques (β)

³proper motion vector.

est donnée par les équations classiques suivantes :

$$\cos \lambda \cos \beta = \cos \alpha \cos \delta, \quad (6.1a)$$

$$\sin \lambda \cos \beta = \sin \alpha \cos \delta \cos \varepsilon + \sin \delta \sin \varepsilon, \quad (6.1b)$$

$$\sin \beta = -\sin \alpha \cos \delta \sin \varepsilon + \sin \delta \sin \varepsilon \quad (6.1c)$$

où $\varepsilon = 23^\circ 26' 21''.4059$ est l'obliquité de l'écliptique pour J2000.0 [Bureau des longitudes, 2012]. Les expressions explicites pour λ et β sont données par :

$$\tan \lambda = \frac{\cos(N - \varepsilon)}{\cos N} \tan \alpha, \quad (6.2a)$$

$$\tan \beta = \tan(N - \varepsilon) \sin \lambda, \quad (6.2b)$$

avec :

$$\tan N = \frac{\tan \delta}{\sin \alpha} \quad (6.3)$$

Nous pouvons donc calculer le vecteur propre de vitesse écliptique $(\dot{\lambda}, \dot{\beta})$.

6.2.2 Détermination des éléments osculateurs

Nous disposons de relations explicites entre les éléments osculateurs (a, e, i) et le vecteur propre de vitesse écliptique $(\dot{\lambda}, \dot{\beta})$ [Bowell et al., 1990] et [Yoshida and Nakamura, 2007]. Ces relations sont données par :

$$\begin{cases} \dot{\lambda} = \frac{k}{r-1} \left[\frac{1}{r} \sqrt{a(1-e^2)} \cos i - 1 \right], \\ |\dot{\beta}| = \frac{k}{r(r-1)} \sqrt{a(1-e^2)} \sin i, \\ r = \frac{a(1-e^2)}{1+e \cos v}, \end{cases} \quad (6.4)$$

k étant la constante de Gauss, et r la distance héliocentrique de l'astéroïde.

En supposant des orbites circulaires ($e = 0$), on pourra déduire une orbite préliminaire :

$$a = \frac{1}{2\gamma} (\gamma - 2k\dot{\lambda} \pm |\kappa|), \quad (6.5a)$$

$$\tan I = \frac{|\dot{\beta}|}{\dot{\lambda} + k/(a-1)}, \quad (6.5b)$$

Où $\kappa = \gamma^2 - 4k\lambda\gamma - 4k^2\beta^2$ et $\gamma = \lambda^2 + \beta^2$.

Les erreurs sur la détermination de a et i sont estimées respectivement à 0,1 au et entre 1° à 5° [Bowell et al., 1990] [Yoshida et al., 2003], ceci résultant de l'approximation circulaire des orbites. La figure 6.4 montre l'histogramme de distribution des excentricités des astéroïdes. On remarquera qu'une grande partie de ces derniers ont des excentricités comprises entre 0.1 et 0.2, avec un pic autour de 0.13.

Afin de donner des ordres de grandeur sur les vitesses orbitales relatives des astéroïdes en arcmin/jour vus de la Terre, j'ai repris les populations identifiées par [Zellner et al., 1985] que

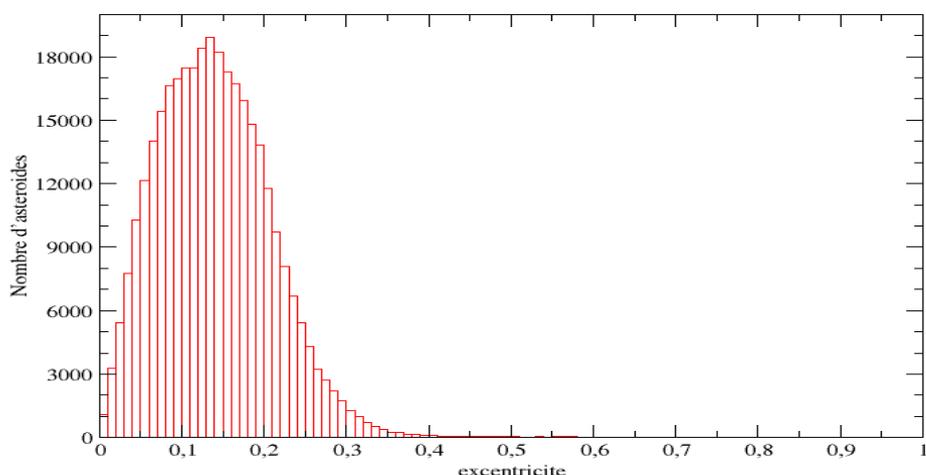


FIG. 6.4: Histogramme des excentricités des astéroïdes numérotés de la ceinture principale.

j'avais redéterminées (Table 3.1). Pour les populations qui peuvent exister près de l'écliptique, et à l'aide des formules 6.4, j'ai calculé la vitesse angulaire $\omega = \sqrt{\gamma}$ en arcmin/jour afin de caractériser ces populations (Table 6.2).

Les valeurs données Table 6.2 nous permettent d'identifier rapidement les astéroïdes observés près de l'écliptique. Dans le chapitre 3, j'ai présenté les diverses distributions qui nous permettent d'étudier les populations d'astéroïdes. La Table 6.2 ainsi que la figure 6.5 nous permettent de les visualiser autrement (voir Annexe D.3 pour le calcul de ω).

Population	Limite en a (au)	Limite en ω (armin/jour)
Flora Family	$2.10 \leq a \leq 2.30$	$15.48 \leq \omega \leq 16.65$
Main Belt I	$2.30 \leq a \leq 2.50$	$14.48 \leq \omega \leq 15.48$
Main Belt IIa	$2.500 \leq a \leq 2.706$	$13.58 \leq \omega \leq 14.48$
Main Belt IIb	$2.706 \leq a \leq 2.82$	$13.13 \leq \omega \leq 13.58$
Koronis zone	$2.83 \leq a \leq 2.91$	$12.80 \leq \omega \leq 13.06$
Eos Zone	$2.99 \leq a \leq 3.03$	$12.39 \leq \omega \leq 12.52$
Main Belt IIIa	$2.82 \leq a \leq 3.03$	$10.23 \leq \omega \leq 12.39$
Griqua Group	$3.10 \leq a \leq 3.27$	$11.64 \leq \omega \leq 12.16$
Main Belt IIIb	$3.03 \leq a \leq 3.27$	$11.64 \leq \omega \leq 12.39$
Cybele Group	$3.27 \leq a \leq 3.70$	$10.51 \leq \omega \leq 11.64$
Hilda Group	$3.70 \leq a \leq 4.20$	$9.46 \leq \omega \leq 10.50$
Jupiter Trojan Group	$5.05 \leq a \leq 5.40$	$7.05 \leq \omega \leq 8.10$

TAB. 6.2: Vitesses angulaires apparentes caractéristiques des populations d'astéroïdes.

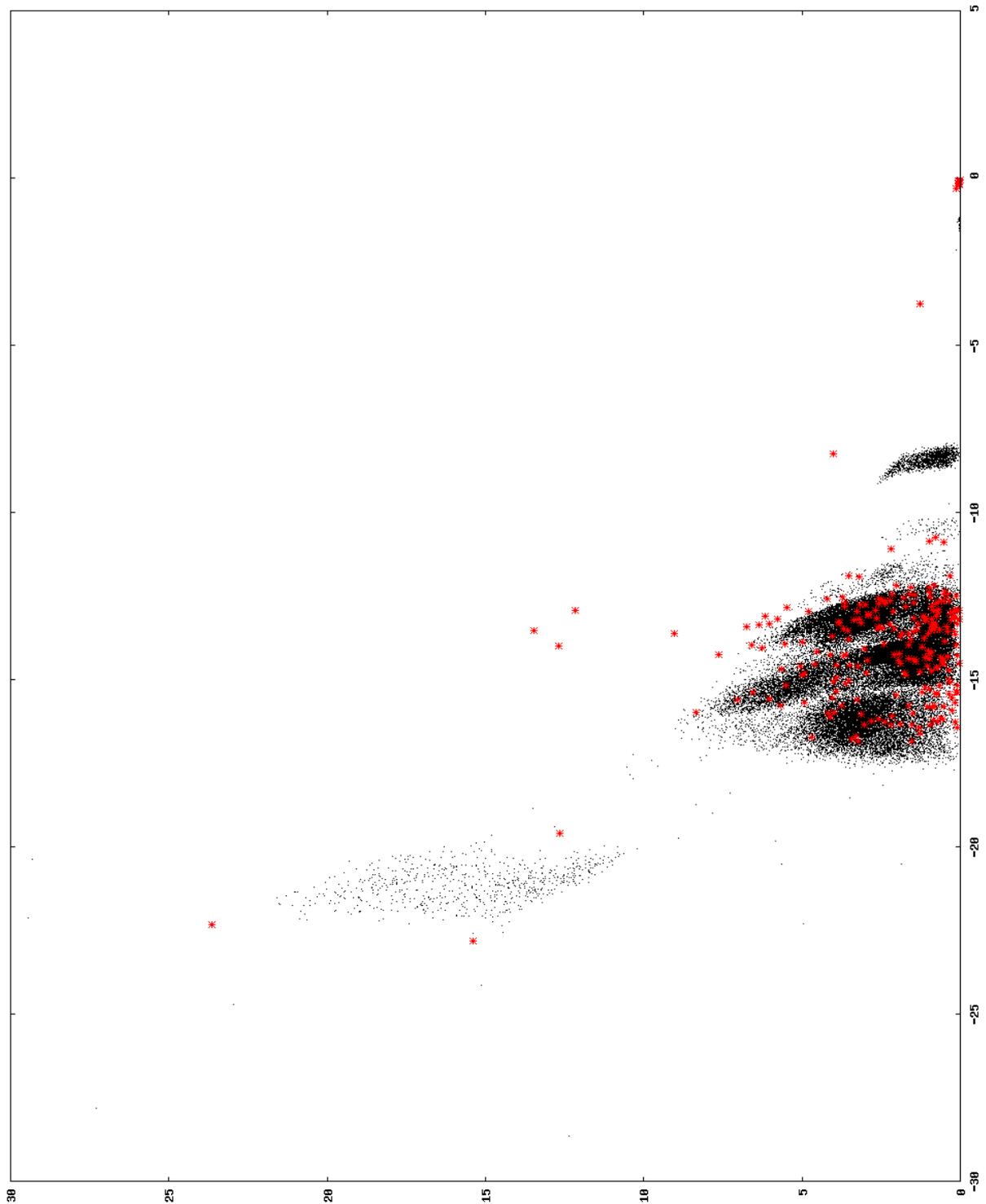


FIG. 6.5: Dans l'espace $(\hat{\lambda}, |\hat{\beta}|)$, en noir les astéroïdes numérotés de la base AstDys, en rouge les astéroïdes détectés dans le champ FIELDA pour la nuit du 02-09-2002 UTC.

Sont représentés en noir (Fig.6.2) les astéroïdes de la base de données AstDys-2⁴, et en rouge tous les objets détectés dans le champ FIELDA.

6.2.3 Analyse des populations identifiées

Sur les 189 astéroïdes détectés, cinq appartiennent à la population des NEAs, et quatre appartiendraient⁵ au groupe des TNOs.

Parmi les astéroïdes que j'ai détectés, je me suis demandée lesquels étaient déjà connus. À l'aide de l'outil de visualisation du ciel ASTPLOT (Asteroid Plot)⁶ développé par Lowell Observatory, j'ai obtenu les cartes suivantes : Fig. 6.6(a) au début de l'observation, Fig. 6.6(b) à la fin de l'observation. J'ai également regardé les poses intermédiaires, mais tous les astéroïdes connus dans le champ FIELDA sont identifiés sur ces deux cartes.

Au nombre de quatorze, ces astéroïdes sont les suivants : (5063) Monteverdi membre de la famille Nysa⁷, (47601) 2000 AQ227 et (192971) 2000 DE14 tous deux membres de la famille dynamique Hygiea, (142354) 2002 RL217, (180359) 2003 YQ85, (192971) 2000 DE14, (231010) 2005 ET41, (239635) 2008 WW12, (252201) 2001 FJ84, (267620) 2002 RK217, (269422) 2009 SX121, (292379) 2006 SQ258, (303651) 2005 LV13, ainsi que les deux astéroïdes non-numérotés 2005 EW10 et 2011 BY31. Seuls 14 astéroïdes sur les 189 astéroïdes détectés sont donc connus.

Pour des raisons pratiques, j'ai adopté la nomenclature suivante pour répertorier les astéroïdes détectés : Ax où A désigne le numéro du pavé $A \in \{0, \dots, 9\}$ et x une lettre de l'alphabet. Ainsi, le cinquième astéroïde détecté sur le deuxième pavé sera noté 2e.

À l'aide des équations 6.5a et 6.5b, j'ai déterminé une orbite circulaire préliminaire pour chacun des objets détectés (a, I). La représentation classique en Nautilus (Fig. 6.7) est plus parlante que celle dans l'espace $(\lambda, |\beta|)$ (Fig. 6.5).

Les astéroïdes détectés dans le champ FIELDA sont représentés en rouge et les points gris désignent les astéroïdes numérotés connus⁸. Comme nous pouvons le constater, les astéroïdes identifiés dans ce chapitre sont répartis sur les diverses populations qui forment les MBAs, et NEAs.

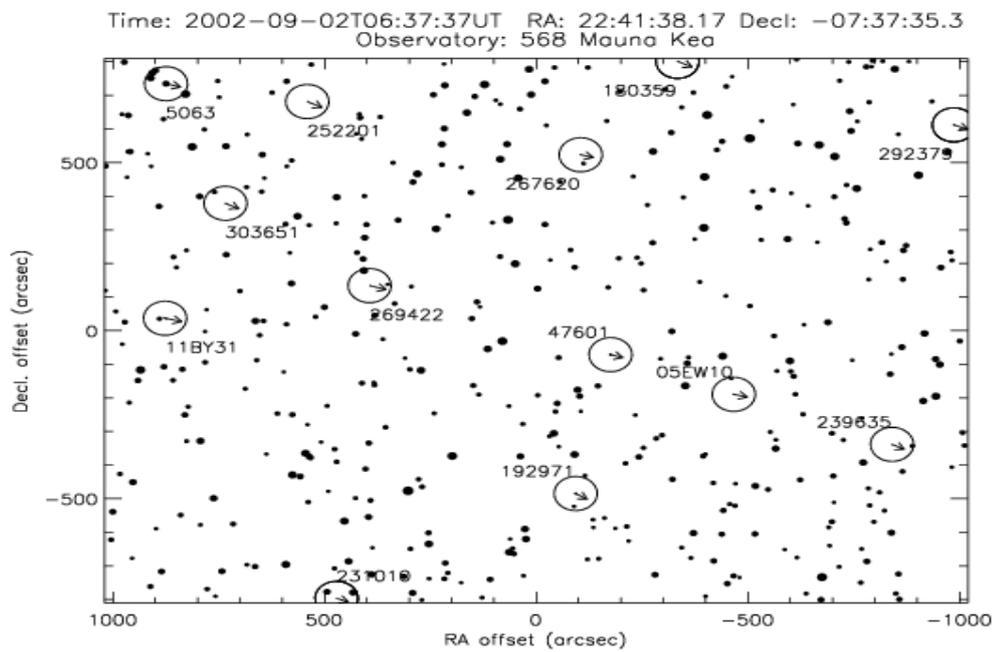
⁴<http://hamilton.dm.unipi.it/astdys/index.php?pc=3.0>.

⁵Je rappelle que si je parle au conditionnel, c'est parce que nous ne pouvons déterminer qu'une orbite préliminaire.

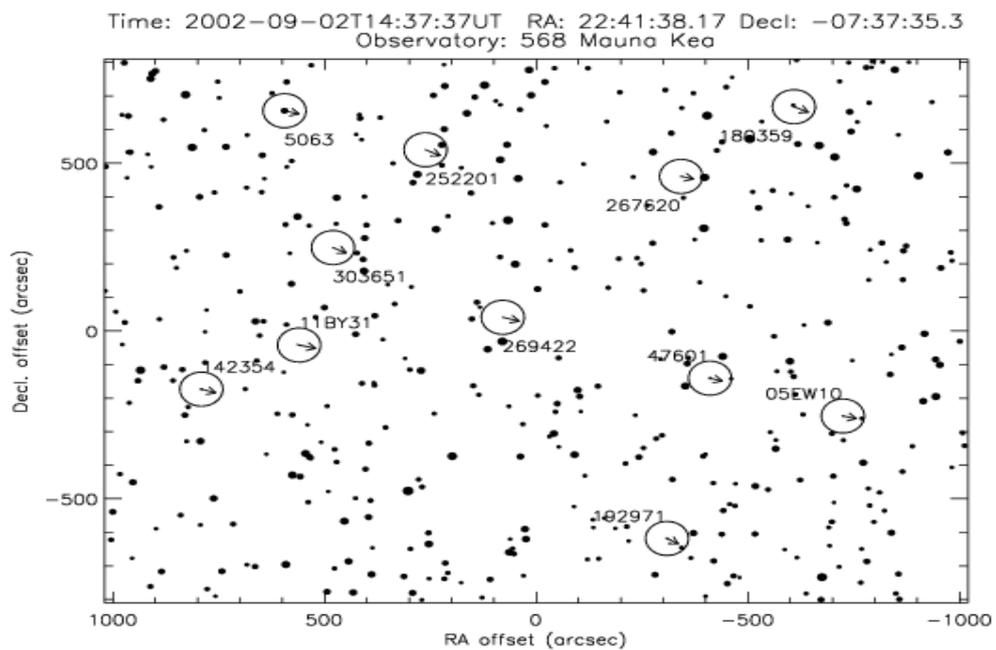
⁶<http://asteroid.lowell.edu/cgi-bin/astplot>.

⁷<http://sbn.psi.edu/ferret/SimpleSearch/form.action>

⁸<http://hamilton.dm.unipi.it/astdys/index.php?pc=0>.



(a) Au début de l'observation



(b) A la fin de l'observation

FIG. 6.6: Les astéroïdes connus dans le champ FIELDA.

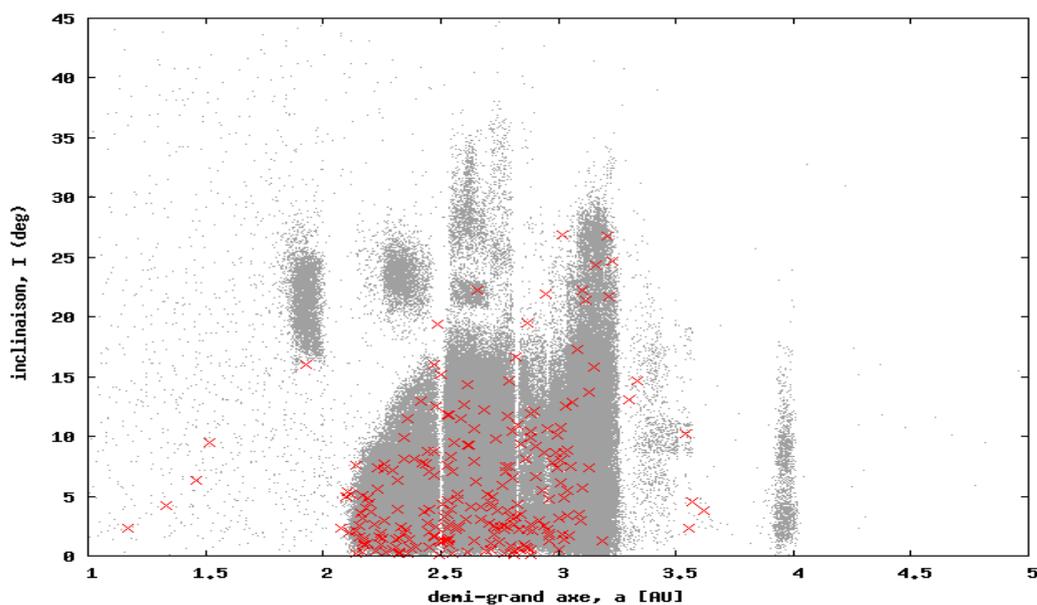


FIG. 6.7: Représentation des objets détectés en rouge. La population des astéroïdes numérotés connus est représentée en gris.

6.2.4 Photométrie et courbes de lumière

L'intérêt des surveys type SMBAS ne s'arrête pas à la détection des astéroïdes. Comme je l'ai précisé plus haut, la détermination d'une orbite précise nécessite des observations sur plusieurs jours, voire plusieurs semaines. Le but des surveys type SUBARU est d'observer des champs de manière ponctuelle pour détecter un maximum d'objets et d'étudier les distributions en matière de taille, taxonomie, relations entre période de rotation, taille, ... Toutes ces propriétés nous renseignent sur les processus dynamiques de collisions et par conséquent sur l'évolution de notre système solaire.

Tout comme la détection des astéroïdes à l'œil nu, la photométrie de ces objets est très laborieuse. J'avais commencé cette étude photométrique à l'aide des procédures DAOPHOT d'IDL⁹ (*aper.pro*), et lors de mon court séjour à NAOJ, sous la direction du Dr. Fumi Yoshida, je me suis par la suite convertie à l'utilisation d'IRAF¹⁰ et du package *apphot*. Finalement, j'ai adopté une autre méthode que je vais expliquer dans les prochains paragraphes et je justifierai ce choix.

La méthode adoptée fait usage du *pipeline* GBOT (Sect. 6.1.2). Bien que la fonction première de celui-ci soit le suivi d'un satellite artificiel dont on connaît déjà les éphémérides, son utilisation dans ce nouveau contexte qu'est l'étude photométrique des astéroïdes lui donne une application scientifique concrète. De plus, cette application aura permis de tester le *pipeline* et de l'améliorer, avec l'aide de Sébastien Bouquillon qui a passé les deux dernières années à le développer. J'ai donc pu l'utiliser à son maximum de potentiel.

Le même principe que pour le suivi de GAIA sera adopté. À savoir :

⁹Interface Description Language.

¹⁰Image Reduction and Analysis Facility.

- qu’il suffira de donner pour chaque objet détecté sa position à une certaine époque et son vecteur vitesse propre ($\dot{\lambda}, \dot{\beta}$) calculé (Sect. 6.2.1). Ces données sont écrites dans l’entête du fichier *.fits*.
- Tout comme pour la calibration astrométrique, le *pipeline* recherche les étoiles non saturées dans le champ. Le catalogue photométrique GSC2.3 [Lasker et al., 2008] est alors téléchargé. Une cross-identification entre les étoiles identifiées sur l’image et celles du catalogue est alors établie. Ceci permet le calcul des constantes de calibration pour le calcul des magnitudes.
- Enfin, à l’aide des éphémérides initialement entrées, le *pipeline* recherche l’objet dans chaque image. Une fois l’objet identifié, les magnitudes sont calculées à l’aide des constantes de calibration mesurées précédemment.

L’avantage du *pipeline* consiste en la détermination des constantes de calibration photométriques directement à partir d’étoiles. A chaque fois, une trentaine d’étoiles sont utilisées pour cette tâche. De plus, le programme est écrit en Fortran 90 et compilable en gfortran, ce qui le rend plus accessible que certaines boites noires d’IDL ou IRAF.

Toutefois, la tâche est beaucoup plus rude que ce que ces quelques lignes pourraient nous laisser croire. En effet, certains astéroïdes s’étalent sur 4 pixels alors que d’autres s’étalent sur 6 ou 7, ces paramètres étant à définir en entrée avec les éphémérides de l’objet. Cette partie du programme ne peut être automatisée. De plus, j’ai utilisé comme éphémérides celles des objets détectés par la première méthode ; l’œil humain ayant ses limites, nous ne sommes jamais à l’abri d’un mauvais pointage et d’une erreur de quelques centaines de *mas*. Avec les éphémérides, il faudra également définir une marge d’erreur grossière sur la position, et petit à petit l’affiner jusqu’à obtenir des positions mesurées représentatives d’une orbite, et par conséquent les magnitudes mesurées tout au long de la traînée observée.

Toutes les courbes de lumière (magnitude fonction. du temps) obtenues ne sont pas exploitables, par exemple celle de l’astéroïde **4t** (Fig. 6.8). Pour cette courbe, nous ne pourrions mesurer que la magnitude de l’objet, et aucune information sur sa rotation ne pourra être déduite.

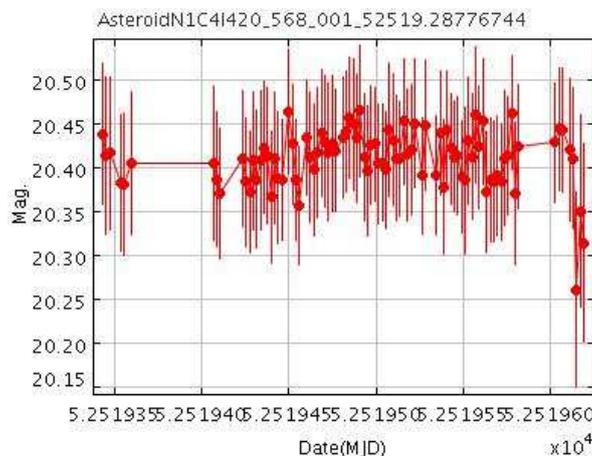


FIG. 6.8: Courbe de lumière obtenue pour l’astéroïde 4t.

CHAPITRE 6. TRAITEMENT DES DONNÉES DU SUBARU TÉLESCOPE : APPLICATIONS

Ast.	epoch (MJD)	α	rms en α	δ	rms en δ	B	R	Class	période (h)	a (au)	i (°)	Fig.
9j	52519.324017	22:40:38.0843	54 mas	-07:31:20.7557	54 mas		22.733±0.119					
	52519.332755	22:40:37.4870	55 mas	-07:31:16.7394	51 mas	23.374±0.183		D ou S		1.169205	2.293369	-
9d	52519.287073	22:40:49.7253	67 mas	-07:28:45.3713	60 mas		23.376±0.120			1.93062	16.044949	-
4r	52519.342779	22:41:12.5538	71 mas	-07:31:11.9014	101 mas		23.788±0.083					
	52519.332755	340.3047145	59 mas	-07:30:59.21892	150 mas	23.914±0.384		D ou S		1.51350	9.463014	-

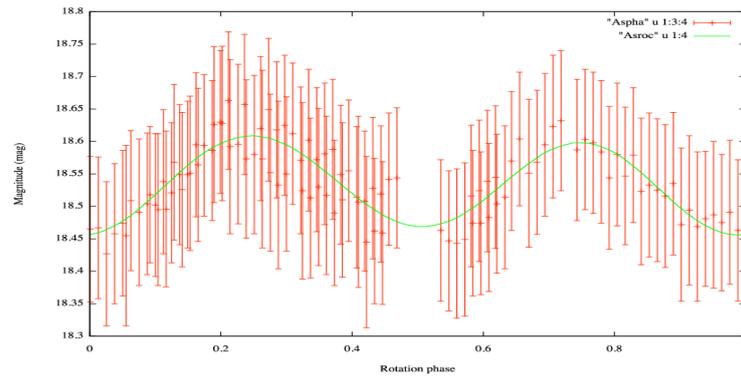
TAB. 6.3: NEAs.

Ast.	epoch (MJD)	α	rms en α	δ	rms en δ	B	R	Class	période (h)	a (au)	i (°)	Fig.
2d	52519.555244	22 :41 :49.6693	46 mas	-07 :31 :37.9096	60 mas		22.537±0.216			3.62014	3.834881	-
4t	52519.410452	22 :41 :10.4574	47 mas	-07 :27 :50.3924	52 mas		20.369±0.074					
	52519.332755	22 :41 :10.4568	44 mas	-07 :27 :50.4378	50 mas	22.399±0.205		C ou M		3.5718	4.54931	-
2u	52519.581904	22 :41 :47.4082	mas	-07 :38 :56.3726	mas		23.151±0.164					
	52519.588455	22 :41 :47.0263	59 mas	-07 :38 :49.1446	75 mas	23.424±0.227		D ou S		15.64555	88.74352	-

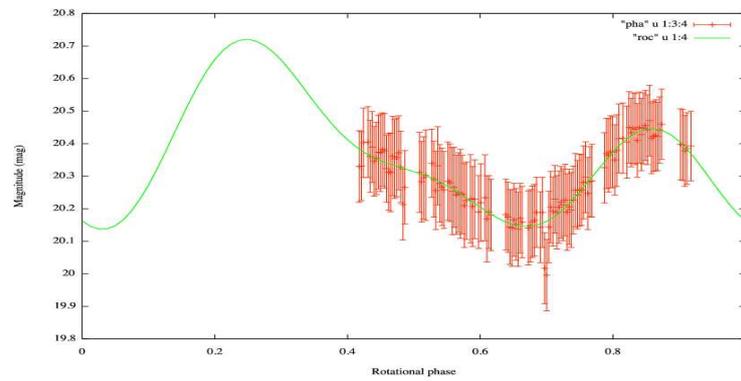
TAB. 6.4: Astéroïdes avec un demi-grand axe supérieur à 3,5 au.

Ast.	epoch (MJD)	α	rms en α	δ	rms en δ	B	R	Classe	période (h)	a	i	Fig.
9i	52519.423293	22:40:29.9451	51 mas	-07:31:37.9095	56 mas		22.505±0.116					
	52519.417952	22:40:29.9455	82 mas	-07:31:38.7116	75 mas	23.811±0.179		C ou M		2.2598448	7.293185	-
7b	52519.410452	22:42:07.2629	43 mas	-07:44:30.8306	49 mas		22.063±0.057					
	52519.415906	22:42:06 :9245	45 mas	-07:44:32.4629	40 mas	23.189±0.186			2.832±0.240	2.22975	2.240464	6.9(c)
7c	52519.293218	22:42:13.8102	155 mas	-07:43:43.3315	92 mas		23.241±0.055			2.6097627	1.299783	-
7e	52519.581904	22:42:05 :5359	42 mas	-07:48:24.4908	43 mas		22.088±0.056					
	52519.588455	22:42:05.2239	46 mas	-07:48:26.1403	43 mas	23.067±0.180			16.392±0.216	2.87793	1.547774	6.9(d)
3e*	52519.278175	22 :41 :18.6591	37 mas	-7 :39 :05.4544	38 mas		20.330 ± 0.110					
	52519.268843	22:41:19.1777	31 mas	-7:39:03 :3455	34 mas	21.358 ± 0.184		D or S	15.84 ± 0.96	2.56063	3.93947	6.9(b)
2p-3d*	52519.410452	22:41:19.4399	42 mas	-7:39:14.7420	41 mas		18.459 ± 0.11					
	52519.415906	22:41:19.6848	37 mas	-7:39:15.92532	37 mas	19.277 ± 0.230		D or S	4.08 ± 0.72	3.10628	4.30978	6.9(a)

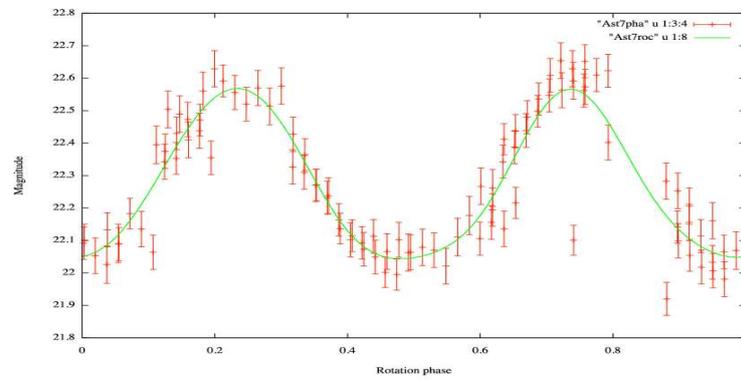
TAB. 6.5: MBAs.



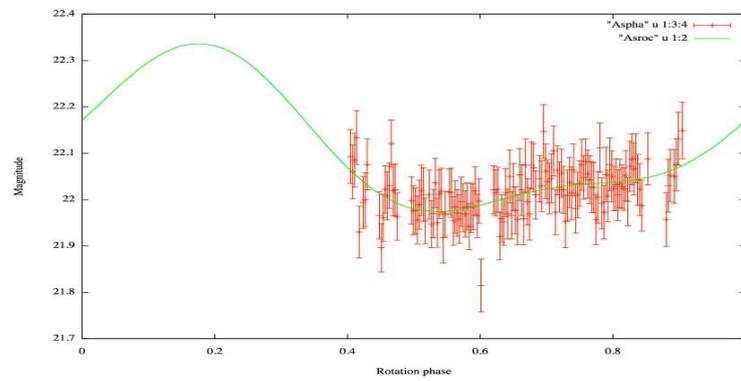
(a) Astéroïde 3d.



(b) Astéroïde 3e.



(c) Astéroïde 7b.



(d) Astéroïde 7e.

FIG. 6.9: Courbes de lumière pour quelques astéroïdes détectés (Table 6.5)

Comme je l'ai montré tout au long de ce chapitre, une bonne partie du travail tant au niveau détection des objets que des mesure des magnitudes ainsi que l'établissement des courbes de lumière ne peut être automatisé. Dans les Tables 6.3 à 6.5, je donne pour quelques astéroïdes identifiés appartenant à différentes populations dynamiques leurs éléments orbitaux (a, I), leur magnitude dans la bande R et dans la bande B, si observés dans cette bande, ainsi que les coordonnées (α, δ) à l'époque correspondante.

Pour les astéroïdes observés dans les bandes B et R, je donne aussi une classification taxonomique : si la différence des magnitudes B-R est inférieure à 1,1 l'astéroïde est de classe D ou S ; au contraire si B-R est supérieure à 1,1 alors l'astéroïde est de type C ou M.

J'ai présenté figure 6.8, la courbe de lumière de l'astéroïde 4t, courbe que j'ai qualifiée de non exploitable. A titre de contre-exemple je présente (Fig. 6.9) les courbes de lumière de quatre astéroïdes 2p-3d*¹¹, 3e*, 7b et 7e. En rouge, je représente les magnitudes mesurées ainsi que les barres d'erreurs associées, en vert la véritable courbe de lumière obtenue par ajustement des données mesurées. Ces courbes font ressortir l'aspect périodique de la rotation. J'expliquerai la méthode utilisée pour les obtenir et mesurer les périodes de rotations dans les prochains paragraphes.

6.2.5 Période de rotation des astéroïdes

Pour déterminer les périodes de rotation nous avons utilisé une des méthodes utilisées par Yoshida et ses collaborateurs [Yoshida et al., 2004] pour la détermination de la période synodique de l'astéroïde (832) Karin. La méthode a également fait ses preuves dans le cadre de l'étude des courbes de lumière des astéroïdes sub-kilométriques [Dermawan et al., 2011] et la distribution de taille des astéroïdes en fonction des périodes de rotation, pour le survey SMBAS-I.

Cette méthode consiste en une analyse spectrale par la méthode des moindres carrés (Spectral analysis, SpAn) [Lomb, 1976].

6.3 Perspectives

Dans ces deux derniers chapitres, j'ai présenté les données SMBAS-III et les méthodes qui seront utilisées pour leur analyse. Je me suis focalisée sur l'aspect détection des objets et j'ai comparé deux méthodes de détection ; la méthode classique dans les traitements SMBAS introduite par [Yoshida et al., 2001] et une nouvelle méthode numérique de détection. Même si la méthode numérique est à ce jour moins performante que la méthode classique, le travail présenté dans ces deux chapitres m'aura permis d'identifier certaines lacunes qui devront être comblées, car nous ne pourrons plus, dans les années à venir traiter les grands volumes de données par les méthodes classiques.

J'ai également travaillé sur des méthodes de détermination de courbes de lumière ; le choix final pour l'utilisation du *pipeline* GBOT se justifie par une meilleure détermination des constantes

¹¹Cet astéroïde s'étale sur les deux pavés : 2 et 3. L'astérisque dénote les astéroïdes étudiés dans [Souami et al., 2012c]

de calibration photométrique. De plus ce programme est écrit en fortran 90, il sera donc facile à combiner avec le programme de détection une fois ce dernier amélioré.

Je n'ai cependant pas contribué à la partie concernant la détermination des périodes orbitales, celle-ci ayant déjà fait ces preuves. Les méthodes présentées et testées dans ces chapitres seront utilisées dans les mois à venir dans le traitement des données SMBAS-III.

Nul ne doute aujourd'hui de la richesse de celles-ci. En effet plusieurs études sont déjà envisagées à partir de ces données concernant les astéroïdes sub-kilométriques :

- l'étude des distributions des MBAs en terme de taille.
- l'étude des distributions des MBAs en terme de classes taxonomiques.
- l'étude des courbes de lumière des astéroïdes détectés et de la corrélation taille, période de rotation.

CONCLUSION

Dans cette thèse, je me suis intéressée à l'étude des astéroïdes de la ceinture principale, vestiges du système solaire primitif. J'ai abordé divers aspects de cette population qui constitue un immense réservoir permettant de tester théories et modèles dynamiques.

J'ai tout d'abord rappelé l'aspect historique de la recherche et de la découverte du premier astéroïde, Cérès. J'ai montré comment celles-ci étaient liées à la notion de référentiel et de recherche de régularité dans le système solaire, en particulier celle attachée à l'ordre des distances des planètes au Soleil (loi de Titius-Bode). J'ai ensuite abordé les statistiques concernant la population connue à ce jour.

Je me suis également posée la question de définir le plan de référence le mieux approprié à l'étude des astéroïdes, à savoir le *plan invariable* dont j'ai défini l'orientation en utilisant des éphémérides numériques à long terme. J'ai donné cette orientation par rapport à l'ICRF-2 et à l'écliptique-équinoxe de J2000.0. J'ai également évalué la contribution de chaque planète à la norme du moment angulaire total.

Une fois ce plan de référence défini, j'ai consacré une étude aux populations d'astéroïdes définies par éléments osculateurs en particulier dans les diagrammes (i, Ω) définissant les plans orbitaux. Ceux-ci laissent apparaître des structures de type sinusoidal qu'il convient d'interpréter par les équations du mouvement. Ainsi j'ai mis en évidence l'effet séculaire à l'origine de ces structures, attribuées à Jupiter. Dans ce but j'ai utilisé des méthodes aussi bien numériques que semi-analytiques.

Je me suis aussi intéressée à la distribution des astéroïdes, dans l'espace des éléments propres, définissant des familles. Mes efforts se sont concentrés sur les membres de la famille de l'astéroïde (4) Vesta, et à leur diffusion, conséquence des rencontres proches avec ce corps parent aussi bien qu'avec (1) Cérès et (2) Pallas, en intégrant l'effet Yarkovsky.

Enfin, j'ai consacré la dernière partie de cette thèse à la réduction des données d'observations au foyer du très grand télescope japonais SUBARU (8,2m). J'ai analysé une série de 140 images mosaïque CCD d'un même champ écliptique en détectant près de deux cents astéroïdes dont certains de taille sub-kilométrique. J'ai adopté deux méthodes de détection, l'une à l'œil nu, l'autre automatisée pour identifier les traînées. Après la réduction astrométrique permettant l'estimation d'une orbite préliminaire, j'ai pu obtenir des courbes de lumière mettant en évidence les périodes de rotation de certains objets. J'ai ainsi pu mettre en évidence des TNO's aussi bien que des rotateurs rapides.

J'ai ainsi pu me pencher sur plusieurs aspects aussi bien dynamiques, qu'observationnels des

astéroïdes de la ceinture principale, permettant une très large couverture du sujet et augurant des études plus approfondies d'un grand intérêt.

Annexes

ANNEXE A

DISTANCES ENTRE PLANÈTES : DES SPHÈRES HARMONIQUES DE PTOLÉMÉE À LA LOI DE TITIUS-BODE.

'The scientific principles that man employs to obtain the foreknowledge of an eclipse, or of anything else relating to the motion of the heavenly bodies, are contained chiefly in that part of science which is called trigonometry, or the properties of a triangle, which, when applied to the study of the heavenly bodies, is called astronomy ; when applied to direct the course of a ship on the ocean is called, it is called navigation ; when applied to the construction of figures drawn by rule and compass, it is called geometry ; when applied to the construction of plans and edifices, it is called architecture ; when applied to the measurement of any portion of the surface of the earth, it is called land surveying. In finè, it is the soul of science ; it is an eternal truth ; it contains the mathematical demonstration of which man speaks, and the extent of its uses is unkown.' - Passage écrit pas Thomas Paine (1737-1809), en 1794 [[Cunningham, 2001](#)].

A.1 Introduction

La question des distances entre les planètes remonte à la Grèce antique. Pour Thalès¹(env. -625.-547), la Terre est un disque flottant sur une sorte d'océan, et l'air provient de l'évaporation de cet océan [[Lequeux, 2012](#)].

Cependant pour Anaximandre (env. -610,-546), disciple de Thalès, le Terre est au centre de l'*inifini* et elle n'a pas besoin d'être portée ni par l'océan de Thalès ni par le géant Atlas. Étant dans l'*inifini*, il n'y a donc aucune direction privilégiée dans l'espace. Tous les astres tournent autour de la Terre, sur des roues de différents diamètres et de différentes inclinaisons par rapport au plan de la Terre [[Ramnoux, 2012](#)]. L'estimation de ces diamètres ne repose sur aucune base scientifique, et les étoiles dans ce modèle sont plus proches de nous que le Soleil et la Lune [[Lequeux, 2012](#)].

¹fondateur de l'école Ionienne

Vers l'an 531 avant notre ère, alors même que l'école Ionienne est en plein essor, le philosophe et mathématicien grec Pythagore (580 - 500 J.-C.) fonde une école de philosophie à Crotona (dans le sud de l'Italie contemporaine, en Toscane). Au sein de cette école, il développe ce qu'on connaît sous le nom de l'*harmonie des sphères* et est probablement le premier à associer musique et astronomie. Dans son harmonie des sphères, il stipulera que, tout comme en musique où il existe une gamme qui définit l'intervalle entre les notes, les distances entre les planètes sont bien définies (pour plus de détails historiques, voir : [Cunningham \[2001\]](#), Dominique Proust : "L'harmonie des sphères", éditions Dervy-livres) par des harmoniques similaires.

Pour Pythagore et ses disciples, tout est régulé par une série de nombres : art, musique, science, astronomie... En astronomie, ce sont les distances entre planètes (qui sont toutes portées par des sphères concentriques tournant autour de la Terre) qui forment une série *harmonique* ².

L'idée qui ressort de cette pensée est la suivante : la Terre est un corps céleste central qui occupe le centre de plusieurs sphères concentriques. Les planètes occupent des harmoniques définies par les diamètres des sphères qui les portent. L'ordre des planètes (selon une hiérarchie mythologique) est le suivant : Lune, Vénus, Mercure, Soleil, Mars, Jupiter et Saturne, la sphère des Fixes (étoiles) étant la dernière.

A.2 Kepler et sa vision du monde

La question des distances entre les planètes continuera à intriguer astronomes, mathématiciens et physiciens. L'Harmonie des sphères, qui a pour principe sous-jacent l'unification entre astronomie, mathématiques et musique, a dominé la pensée pendant plusieurs siècles ; on retrouvera ce concept jusqu'au milieu du XVIIe siècle, chez l'allemand Johannes Kepler (1571-1630) et le français Marin Mersenne (1588-1648) [[Cunningham, 2001](#)].

L'astronome canadien Cunningham, C.J. (1955-), met en relief le rôle et la quintessence de Kepler dans l'évolution de cette pensée. En effet, Kepler, qui a été imprégné de cette pensée, finira par en rejeter les deux piliers qui, à mon sens, sont les piliers fondateurs, à savoir rejeter les cercles en faveur des ellipses (on ne parlait pas encore d'orbite à cette époque) et rejeter géocentrisme.

A la fin du XVIe siècle, dans la préface de *Mysterium cosmographicum* (1596) [[Kepler, 1596](#)], Johannes Kepler (1571-1630) posera la question des distances entre les planètes, adoptant dans un premier temps la vision héliocentrique³. En parlant de Copernic, il écrira "... J'en étais même venu à assigner aussi à la Terre le mouvement du Soleil, mais alors que Copernic le fait pour des raisons mathématiques, je le faisais à partir de raisons physiques ou mieux encore, métaphysiques" [[Kepler, 1596](#)].

Kepler, à la recherche d'un ordre établi et d'une régularité dans la disposition des planètes, proposera une idée qu'il qualifiera "d'extraordinairement audacieuse" : il parlera d'une planète manquante entre Mars et Jupiter et une autre entre Vénus et Mercure. Il expliquera la présence

²C'est ce besoin persistant d'harmonie mystique qui conduit Parménide (env. -515,-450) à supposer la Terre sphérique, la sphère étant *le volume le plus parfait*.

³dont il démontrera le fondement avant de finir par la rejeter (*Mysterium cosmographicum*)



FIG. A.1: Johannes Kepler (1571-1630)

de cette lacune ou l'absence d'un corps entre Mars et Jupiter par une dissonance. Il finira toutefois par rejeter cette idée.

Kepler commence sa préface ainsi : “Mon dessein, Lecteur, est de démontrer dans ce petit ouvrage que le Créateur Très Bon et Très Grand s'est référé pour la création de ce monde mobile et la disposition des cieux à ces cinq corps réguliers qui, depuis Pythagore et Platon jusqu'à nos jours, ont acquis une si grande célébrité et qu'il a ordonné en fonction de leur nature le nombre des cieux, leur proportion et le rapport de leurs mouvements” [Kepler, 1596].

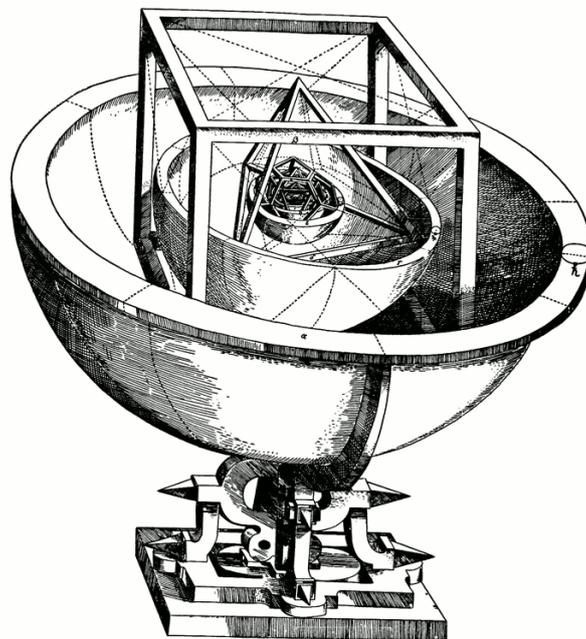


FIG. A.2: Modèle Keplerien du système solaire, basé sur les cinq solides de Platon.

Kepler, écrira que l'idée d'utiliser les cinq solides Platoniciens lui est venu le 19 juillet 1595 [Cunningham, 2001]. Ces solides sont l'hexaèdre (cube), le tétraèdre, le dodécaèdre, l'icosa-

èdre, l'octaèdre cités dans cet ordre de l'extérieur vers l'intérieur du système planétaire. Les solides sont imbriqués les uns dans les autres et séparés par des sphères inscrites et circonscrites (Fig. A.2). Les sphères portent les orbites des planètes. Dans ce modèle retenu par Kepler, il finira par abandonner l'idée de l'existence d'une autre planète entre Mars et Jupiter (et d'une autre entre Vénus et Mercure).

Giovanni Piazzi, découvreur de la dite planète manquante (entre Mars et Jupiter, voir sect. 1.2.2), dira en 1802 que, même si, pour lui, Kepler est le père fondateur de l'astronomie moderne, son attachement et sa fascination pour les écrits de la Grèce antique (fascination qui dominait à la Renaissance), et notamment pour les écrits de Ptolémée et Pythagore, l'empêcheront de voir que la 'lacune' qu'il avait mise en évidence entre Mars et Jupiter et qu'il avait rejetée ne pouvait co-exister avec cette vision.

A.3 Loi de Titius-Bode

Depuis l'antiquité, on a cherché à formuler des lois géométriques expliquant les mouvements des planètes et les distances entre elles. En 1596, dans son livre *Mysterium Cosmographicum*, Kepler explique pourquoi le système solaire contient exactement six planètes (connues à l'époque) et justifie encore une fois géométriquement les valeurs des distances au Soleil. Cette formulation géométrique est en profonde contradiction avec les données observationnelles. Elle est toutefois retenue pour sa beauté mathématique.

Plus d'un siècle plus tard Christian Frieherr von Wolf (1679-1754) présage donc ce qui deviendra par la suite la loi de Titius-Bode :

If one gives the distance from the Earth to the Sun in 10 units, then the distance to Mercury from the Sun is 4 units, that of Venus 7, that of Mars 15, that of Jupiter 52 and that of Saturn 100. [Nieto, 1972]

En 1764, Johann Titius (1729-1796), mathématicien, physicien et astronome allemand qui remarquera lui aussi cette distribution particulière des planètes dans le système solaire, glissera sa formulation [Nieto, 1972], [King-Hele, 1973] dans la traduction allemande de "Contemplation de la Nature" de Charles Bonnet en 1764 (plus précisément première partie, chapitre 4, entre les paragraphes 7 et 8 de la version originale).

En 1772, Johann Elert Bode (1747-1826) tombe sur la formulation de Titius de cette loi, la retranscrit dans la seconde édition de son livre (Anleitung zur Kenntniss des gestirnten Himmels) sans citer de source ni même accorder de crédit à Titius pour cette formulation (du moins dans la première édition de ces écrits) [Nieto, 1972], avant de reconnaître en 1784 qu'il avait pris connaissance des écrits de Titius [Cunningham, 2001].

Dans la troisième édition de son livre parue en 1777, il écrira : "From the law discovered by Kepler, that the ratio of the periods of revolution of the two planets behaves like the ratio of the cubes of their distances from the Sun, it can be calculated that this main planet between Mars and Jupiter must complete its revolution around the Sun in 4 ½ years" [Nieto, 1972].

Cette loi sera retranscrite en 1787 par Vikarius Johann Friedrich Wurm (1760-1833), sous

forme de l'équation :

$$a_n = 4 + 3.2^{n-1} \quad (\text{A.1})$$

a_n est la position (distance moyenne au Soleil) de la $n^{\text{ième}}$ planète. La distance Terre-Soleil était *normalisée* à 10.

Aujourd'hui elle est connue de tous sous la forme suivante [Murray and Dermott, 1999] :

$$a_n = 0.4 + 0.3.2^{n-1} \quad (\text{A.2})$$

Elle gagnera en crédibilité à la découverte d'Uranus, le 13 mars 1781, par William Herschel (1738-1822), puis à la découverte du premier astéroïde Cérès, le 1er janvier 1801 (par Guiseppe Piazzi (1746-1826)) [Nieto, 1972], [Cunningham, 2001].

On remarquera par la suite que cette loi se révélera fausse pour Mercure. De même, la découverte de Neptune le 23 septembre 1846 sera un nouveau test que cette loi ne passera pas. Même si Leverrier et Adams ont supposé la validité de cette loi. Prédissant respectivement une distance de 37,25 au et 36,15 au, en 1847, Sears Cook Walkers (1805-1853) qui reprend des observations antérieures de Neptune (observation de Lalande), prédit un positionnement pour Neptune à 30,25 au. Ce qui sera un échec de plus pour la dite loi de Titius-Bode.

Plusieurs études s'en suivront tout au long du XIXe et du XXe siècle pour apporter des modifications à cette loi de Titius-Bode, que l'on considérera désormais comme une première loi pour prédire les distances moyennes des planètes à leur étoile.

If there is truth in the Law, the original form should be thought more likely to be a good first guess, but certainly not necessarily the best guess to which to refer theories ! (Nieto, 1972, p. 29)

Parmi toutes ces contributions, on citera celle de Wurm, Ludwig Wilhelm Gilbert (1769-1824) ou encore celle de James Challis (1803-1882). Tous essaieront d'appliquer une loi de type Titius-Bode aux systèmes de satellites et aux anneaux des planètes géantes⁴.

Peu de temps après la découverte de Neptune (1846), Daniel Kirkwood s'intéressera lui aussi au problème. Il posera une nouvelle formulation de la loi qui sera source de controverses pendant quelques années [Nieto, 1972]. Je ne m'attarderai pas sur cette formulation. Cependant, je ferai remarquer, une fois de plus, que c'est cette recherche *d'harmonies* dans le système solaire, qui le mènera à remarquer ce que nous connaissons aujourd'hui sous le nom de *lacunes de Kirkwood*⁵, dans la ceinture principale d'astéroïdes.

A.3.1 Formulation de Balgg-Richardson

Parmi les contributions les plus importantes à l'évolution de cette loi datant du début du siècle dernier, on en notera deux introduites de manière indépendantes ; en 1913 celle de Mademoi-

⁴Plusieurs des astronomes, mathématiciens, physiciens qui se seront intéressés au problème croiront être des précurseurs dans le domaine [Nieto, 1972].

⁵Lacunes qui apparaissent dans les diagrammes de représentations comme des demi-grands axes des astéroïdes de la ceinture principale. Ces lacunes correspondent à des commensurabilités entre les moyens mouvements des astéroïdes et le moyen mouvement de Jupiter.

selle Mary Adela Blagg (1858-1944) et, en 1945, celle de Richardson, D. E. Tous deux s'intéresseront au logarithme des distances des planètes au Soleil, en fonction de l'indice n (indice de la planète). En reprenant les mêmes notations que pour la formulation précédente (Eq. A.2) :

$$a_n = A(1.7275)^n [B + f(\alpha + n\beta)] \quad (\text{A.3})$$

Le facteur 1,7275 s'avèra être après plusieurs tests, celui qui fournit un meilleur ajustement aux données observationnelles. A , B , α et β sont des constantes caractéristiques de chaque système (système Soleil+planètes, système de Jupiter, système de Saturne et système d'Uranus). La fonction f est 2π périodique. Cette formulation fournira des résultats plus satisfaisants que les formulations précédentes, cependant elle échouera pour les petits objets tel que Mimas, le satellite de Saturne.

Toutes ces formulations d'une loi de distances planétaires, de celle de Titius-Bode (Eq. A.2) à celle de Blagg-Richardson (Eq. A.3), sont purement empiriques et aucune justification du problème physique ou mathématique n'est introduite.

Aujourd'hui encore, la question de l'existence d'une loi traduisant la physique des systèmes et donnant ainsi les distances entre planètes reste un problème qui passionne physiciens, mathématiciens et astronomes [Nottale, 1996], [Nottale et al., 2000], [Laskar, 2000].

Avec Jacky Cresson⁶, nous nous sommes demandé si une telle 'loi' (à supposer qu'elle existe) est *une loi de la nature*. Nous avons suivi la même démarche que [Cresson, 2005], à savoir les questions suivantes :

- Qu'est ce qu'une *loi de la nature* ?
- Ou comment conférer, à une loi existante, le status de *loi de la nature* ? ou comment en construire une ?

Après moult réflexions et lectures, nous en avons conclu que deux conditions sont nécessaires pour attribuer ce statut à une loi : l'universalité et l'atemporalité.

Il y a quelques années de cela, J. Cresson et Christophe Biernacki⁷ s'étaient déjà posés la question de l'existence d'une loi de la nature de type Titius-Bode.

Nous abordons donc cette question dans notre article (en cours de rédaction)⁸, en adoptant le *principe de moindre action stochastique* présenté dans [Cresson, 2011]. Afin de contraindre notre système et pour la formulation de l'expression algébrique de la loi, nous utilisons les données de la mission Kepler pour les systèmes d'exo-planètes.

⁶Mathématicien, Professeur à l'Université de Pau, actuellement à Munich, également chercheur associé à l'Observatoire de Paris, dont j'ai suivi les cours en Master 2.

⁷Professeur de Mathématiques. Statisticien à l'Université de Lille.

⁸C. Biernacki, J. Cresson, D. Souami et F. Pierret (Doctorant au SYRTE, encadré par Jacky Cresson).

ANNEXE B

ANNEXE :PLAN INVARIABLE

B.1 Article

The solar system's invariable plane

D. Souami^{1,2} and J. Souchay¹

¹ Observatoire de Paris, Systèmes de Référence Temps Espace (SYRTE), CNRS/UMR 8630, UPMC, Paris, France
e-mail: damya.souami@obspm.fr

² Université Pierre et Marie Curie, 4 place Jussieu, 75005 Paris, France

Received 10 February 2012 / Accepted 9 April 2012

ABSTRACT

Context. The dynamics of solar system objects, such as dwarf planets and asteroids, has become a well-established field of celestial mechanics in the past thirty years, owing to the improvements that have been made in observational techniques and numerical studies. In general, the ecliptic is taken as the reference plane in these studies, although there is no dynamical reason for doing so. In contrast, the *invariable plane* as originally defined by Laplace, seems to be a far more natural choice. In this context, the latest study of this plane dates back to Burkhardt.

Aims. We define and determine the orientation of the *invariable plane* of the solar system with respect to both the ICRF and the equinox-ecliptic of J2000.0, and evaluate the accuracy of our determination.

Methods. Using the long-term numerical ephemerides DE405, DE406, and INPOP10a over their entire available time span, we computed the total angular momentum of the solar system, as well as the individual contribution to it made by each of the planets, the dwarf planets Pluto and Ceres, and the two asteroids Pallas and Vesta. We then deduced the orientation of the *invariable plane* from these ephemerides.

Results. We update the previous results on the determination of the orientation of the *invariable plane* with more accurate data, and a more complete analysis of the problem, taking into account the effect of the dwarf planet (1) Ceres as well as two of the biggest asteroids, (4) Vesta and (2) Pallas. We show that the inclusion of these last three bodies significantly improves the accuracy of determination of the *invariable plane*, whose orientation over a 100 *y* interval does not vary more than 0.1 mas in inclination, and 0.3 mas in longitude of the ascending node. Moreover, we determine the individual contributions of each body to the total angular momentum of the solar system, as well as the inclination and longitude of the node with respect to this latter plane.

Conclusions. Owing to the high accuracy of its determination and its fundamental dynamical meaning, the *invariable plane* provides a permanent natural reference plane that should be used when studying solar system dynamics, instead of the ecliptic. Since it is fixed in an isolated solar system, whereas the ecliptic alters with time, we recommend referring to it when working on long-term dynamics.

Key words. reference systems – planets and satellites: dynamical evolution and stability – methods: numerical – celestial mechanics

1. Introduction

Pierre Simon Laplace (1749–1827) in his *Oeuvres Complètes* (De Laplace 1878) was one of the first scientists to mention the notion of an *invariable plane* of the solar system. He introduced what seemed to be a natural reference plane when studying the motion of celestial bodies (comets, etc.). He showed that for any isolated *N*-body system, subject to mutual gravitational interactions, one can define an *invariable plane* that obeys a simple geometrical property and is the consequence of the dynamics of a conservative system. Thus, it is *the natural reference plane* when studying the system.

Over the past two centuries, a few astronomers (see for instance, See 1904; Innes 1920; Clemence & Brouwer 1955) have worked on determining the orientation of the *invariable plane*. In (See 1904), prior to the discovery of Pluto, the position of this plane was given with respect to the ecliptic of the epoch 1850.0. Its inclination was set to $1^{\circ}35'7''.745$ and the longitude of its ascending node to $106^{\circ}8'46''.688$. In Innes (1920), also prior to the discovery of Pluto, the orientation of the *invariable plane* was given with respect to both the ecliptic and the equator of the epoch 1900.0. The inclination and the longitude of the ascending node of the *invariable plane* with respect to the ecliptic (the equator, respectively) are $1^{\circ}34'59''.42$ and $106^{\circ}35'1''.08$ ($23^{\circ}2'51''.40$ and $3^{\circ}52'41''.38$, respectively).

The last known paper investigating the topic is (Burkhardt 1982). In this paper, the orientation of the *invariable plane* was computed using the numerical Development Ephemerides DE96, DE102, DE108, and DE110. The inclination and the longitude of the ascending node of the *invariable plane* were determined with respect to both the ecliptic-equinox and the equator-equinox of the epoch B1950.0. The orientation was also given with respect to the equator-equinox and ecliptic-equinox of the epoch J2000.0, by applying the precession matrix given in Lieske et al. (1977) and Lieske (1979). For other papers investigating the characteristics of the *invariable plane* with respect to the mean ecliptic-equinox of the epoch B1950.0, we refer to (Burkhardt 1982). These papers underline the principal difficulty in determining its orientation, which lies in the uncertainties of the masses of all the objects involved as well as in their positions and velocities.

The aim of this paper is to deepen the investigation of the notion of the *invariable plane* of the solar system and to define as accurately as possible its orientation with respect to the ecliptic and the equator of the epoch J2000.0. There have been no recent publications investigating the concept since (Burkhardt 1982), though it has been used recently, in the construction of the INPOP ephemeris. Indeed, the ring modeling the perturbation of the main-belt asteroids is assumed to be located in the invariable plane of the ephemeris (Kuchynka et al. 2010; Kuchynka 2010).

In this paper, we propose the use of the most recent long-term numerical ephemeris data to determine the orientation of the invariable plane. In addition to the Sun and its eight planets (the Earth being replaced by the Earth-Moon barycentre – EMB), we show that it is necessary to take account of the motions of dwarf planets such as (134340) Pluto and (1) Ceres, as well as the asteroids (2) Pallas and (4) Vesta in order to optimise this determination. In this paper, we also estimate the individual contributions of each body constituting the system. Our study provides a non-negligible update on the topic as well as a non-standard test of the numerical ephemerides. We note that the *invariable plane* is examined by the *IAU/IAG Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements* in 2006 (Seidelmann et al. 2007) and in the report of WGCCRE 2009 (Archinal et al. 2011) as a reference plane to determine the obliquity of solar system objects. For the planets, the primary pole is the one on the north side of the *invariable plane* of the solar system.

2. Invariable plane

2.1. Definition of the invariable plane

Considering the solar system as isolated, its total angular momentum vector is constant with respect to both spatial and time coordinates. Thus, the invariable plane¹ is defined as the plane perpendicular to the total angular momentum vector of the solar system that passes through its barycentre. Being fixed, it provides a permanent natural reference plane, whereas the ecliptic slightly moves with time.

In this paper, we determine the orientation of the invariable plane by setting its inclination and the longitude of its ascending node with respect to both the ICRF (origin and equator) and the ecliptic-equinox of the epoch J2000.0.

2.2. Determining the orientation of the invariable plane

In Newtonian mechanics, the total angular momentum vector of an N -body system (here, we disregard the rotation of all the bodies) is given by

$$\mathbf{L}_{\text{tot}} = \sum_{j=1}^N m_j \mathbf{r}_j \times \dot{\mathbf{r}}_j, \quad (1)$$

where m_j , \mathbf{r}_j , and $\dot{\mathbf{r}}_j$ are the mass, barycentric position vector, and barycentric velocity vector of the j th body, respectively. The norm of the total angular momentum vector is given by

$$L_{\text{tot}} = \sqrt{L_1^2 + L_2^2 + L_3^2}, \quad (2)$$

with

$$\begin{aligned} L_1 &= \sum_{j=1}^N m_j (y_j \dot{z}_j - z_j \dot{y}_j), \\ L_2 &= \sum_{j=1}^N m_j (z_j \dot{x}_j - x_j \dot{z}_j), \\ L_3 &= \sum_{j=1}^N m_j (x_j \dot{y}_j - y_j \dot{x}_j), \end{aligned} \quad (3)$$

¹ As pointed out by (Tremaine et al. 2009), many people tend to confuse the Laplace plane² with the invariable plane.

² A plane about a planet upon which a satellite's orbital plane precesses because of the perturbations. In the usual case where the satellite's orbit is perturbed by both the oblateness of the planet and the Sun, the Laplacian plane lies between the planet's equatorial plane and the planet's orbital plane about the Sun. It is named after the French mathematician P. S. de Laplace.

where x_j , y_j , z_j (\dot{x}_j , \dot{y}_j , \dot{z}_j , respectively) are the components of the barycentric position (velocity, respectively) vector of the j th body.

From Brouwer & Clemence (1961, Chap. I), we have

$$\begin{aligned} L_1 &= L_{\text{tot}} \sin \Omega \sin i, \\ L_2 &= -L_{\text{tot}} \cos \Omega \sin i, \\ L_3 &= L_{\text{tot}} \cos i, \end{aligned} \quad (4)$$

where L_1 , L_2 , L_3 are the cartesian barycentric components of the total barycentric angular momentum vector \mathbf{L}_{tot} given by (1) and Ω , i are, respectively, the longitude of the ascending node and the inclination of the invariable plane with respect to the reference frame in which are given the position and velocity vectors of the N bodies of the system. In our case, the positions and velocities vectors provided by the numerical ephemerides, are given with respect to the ICRF.

Using Eqs. (1) to (4), we compute the values of i

$$i = \arccos \frac{L_3}{L_{\text{tot}}} \quad (5)$$

and Ω

$$\Omega = \arctan \frac{-L_1}{L_2}. \quad (6)$$

The relativistic effects being taken into account up to first order in the post-Newtonian approximation in the compilation of the numerical ephemerides DE405/DE406 (Standish 1998) and INPOP10a (Fienga et al. 2010), (Kuchynka 2010), the total angular momentum vector initially given by (1) becomes

$$\mathbf{L}_{\text{tot}} = \sum_{j=1}^N m_j^* \mathbf{r}_j \times \dot{\mathbf{r}}_j, \quad (7)$$

where m_j is the mass of the j th body being replaced by a corresponding effective mass m_j^* (the so-called Tolmann-Mass)

$$m_j^* = m_j \left[1 + \frac{\mathbf{r}_j^2}{2c^2} - \frac{1}{2c^2} \left(\sum_{k \neq j} \frac{Gm_k}{|\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_j|} \right) \right], \quad (8)$$

$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ is the velocity of light in vacuum (Luzum et al. 2011) and G is the gravitational constant (see Standish et al. 1976, for more details about (7); a proof can also be found in Brumberg 1991).

2.3. Method

To determine the position of the invariable plane, we use two different long-term numerical ephemerides:

- The Development Ephemerides DE 405/406 (Standish 1998).
- The INPOP10a Ephemeris (Fienga et al. 2010; Kuchynka 2010).

The Development Ephemerides DE405/DE406 (Standish 1998) are not the most recent ephemerides provided by the JPL, but are the ones with the longer available time span (about 6000 y for DE406). The orientation of the inner planetary system of DE405 is accurate to about 0.001 arcsec. The position ephemerides of the outer planets provided by the

Table 1. Time coverage of the adopted numerical ephemerides.

Numerical ephemeris	Times span (JD)	Time-span	Number of days	Number of years
INPOP10a	2 076 569.0–2 826 520.0	03 May 973 to 25 Aug. 3026	749 951	2053.25
DE405	2 305 424.5–2 524 624.5	09 Dec. 1599 to 31 Jan. 2200	219 200	600.13
DE406 ¹	625 360.50–2 816 848.5	23 Feb. –3001 to 2 March 3000	2 191 488	5999.96

References. ⁽¹⁾ From (Standish 1998): “only the interval, 1600 AD to 2200 AD, has been fit with full precision Chebyshev polynomials, this set of polynomials is referred to as DE405”.

Table 2. Primary constants used for the compilation of the DE405/DE406 (Standish 1998) and the INPOP10a long-term numerical ephemerides.

Constant	Description	DE405/406 Values	INPOP10a Values
AU (km)	astronomical unit	149 597 870.691	¹ 149 597 870.6910
GM_{\odot} (km ³ s ⁻²)	Heliocentric gravitational constant	1 327 124 400 17.987	¹ 1 327 124 400 55
GM_E (m ³ s ⁻²)	Geocentric gravitational constant		¹ 3.986004414 × 10 ¹⁴
EMRAT	Ratio of the mass of the Earth to the Moon	81.30056	² 81.3005 700
M_{\odot}/M_{Me}	Ratio of the mass of the Sun to Mercury	6 023 600.	² 6 023 600.
M_{\odot}/M_{Ve}	Ratio of the mass of the Sun to Venus	408 523.71	² 408 523.719
M_{\odot}/M_E	Ratio of the mass of the Sun to the Earth	332 946.050895	
M_{\odot}/M_{Ma}	Ratio of the mass of the Sun to Mars	3 098 708.	² 3 098 703. 59
M_{\odot}/M_J	Ratio of the mass of the Sun to Jupiter	1047.3486	² 1047.3486 44
M_{\odot}/M_{Sa}	Ratio of the mass of the Sun to Saturn	3497. 888	² 3497. 9018
M_{\odot}/M_U	Ratio of the mass of the Sun to Uranus	22 902.98	² 22 902.98
M_{\odot}/M_N	Ratio of the mass of the Sun to Neptune	19 142.24	² 19 412.26
M_{\odot}/M_P	Ratio of the mass of the Sun to (134340) Pluto	135 200 000.	² 136 566 000.
M_{Ceres}/M_{\odot}	Ratio of the mass of (1) Ceres to the Sun	4.7 × 10 ⁻¹⁰	¹ 4. 75836 × 10 ⁻¹⁰
M_{Pallas}/M_{\odot}	Ratio of the mass of (2) Pallas to the Sun	1.0 × 10 ⁻¹⁰	¹ 1. 11394 × 10 ⁻¹⁰
M_{Vesta}/M_{\odot}	Ratio of the mass of (4) Vesta to the Sun	1.3 × 10 ⁻¹⁰	¹ 1. 33137 × 10 ⁻¹⁰

References. ⁽¹⁾ From (Fienga et al. 2010). ⁽²⁾ From (Luzum et al. 2011).

DE405/406 rely mainly upon optical observations. For instance, Jupiter’s observations are fit by DE405 to an accuracy of 0.01 arcsec. The perturbations of the 300 asteroids that have the strongest influence on the Earth, Moon, and Mars were introduced, in two steps:

1. The three largest main belt asteroid objects (1) Ceres, (2) Pallas, and (4) Vesta were integrated as massive particles under the gravitational perturbation of the Sun, the eight planets, the Moon, and Pluto. The results were fit by temporary Chebyshev polynomials.
2. The 297 remaining main belt asteroids, considered as massless, were integrated under the gravitational influence of the Sun, the eight planets, the Moon, Pluto, Ceres, Pallas, and Vesta. The final results were then fit with Chebyshev polynomials, providing us with a full planetary and lunar integration.

INPOP10a (Fienga et al. 2010; Kuchynka 2010) is the most recent available numerical ephemeris provided by the IMCCE. Thus, it exploits the most recent observational constraints provided by the MEX and VEX missions for Mars and Venus, the Cassini mission for Saturn, several sets of flybys data of Jupiter, Uranus, and Neptune (Pionner 10 and 11, Viking 1 and 2, Ulysses and Cassini), and stellar occultations in the case of Pluto. INPOP10a is fitted over the time interval [1914.2:2009.7], the results are then extrapolated over a longer time interval (Table 1). In addition to the 300 most strongly perturbing main belt asteroids, the perturbations of 24635 asteroids are averaged over a ring, of an analytically estimated radius of 2.8 AU (Kuchynka et al. 2010; Kuchynka 2010). The initial inclination

of this ring, with respect to the invariable plane³, was chosen to be equal to zero.

Table 1 illustrates the available time span for each numerical ephemeris. Moreover, the primary constants for both the DE(405/406) and INPOP10a ephemerides are given in Table 2.

Using Eqs. (2) to (8), we computed from each ephemeris over its entire time span, with a 1 *d* time step, the values of *i* and Ω (the inclination (Eq. (5)) and the longitude of the ascending node (Eq. (6)), respectively) of the invariable plane with respect to the origin-equator of the ICRF. For this purpose, we considered two physical systems, one basic and the other more complete. This is described in detail in Sect. 3.

The ephemerides being given with respect to the ICRF, the resulting Ω and *i* of the invariable plane give its orientation with respect to this reference frame, where the origin of the longitude of the ascending node is the ICRF’s one (intersection of the orbit with the *x*-axis of the ICRF, Fig. 1), and the inclination is given with respect to the equator of the ICRF given by the *x* – *y* axes.

To obtain the position of the invariable plane with respect to the equinox-ecliptic of the epoch J2000.0, we proceed to a coordinate transformation for the total angular momentum vector *L* (see Fig. 1).

Noting L_{ecl} (L_{ICRF} , respectively), the total angular momentum of the solar system computed with respect to the equinox-ecliptic J2000.0 (the ICRF, respectively), this transformation involving two matrices is given by the equation

$$L_{\text{ecl}} = R_x(\epsilon)R_z(\varphi)L_{\text{ICRF}} \quad (9)$$

³ Of an inclination of 23°00’32’’ and a longitude of the ascending node of 3°51’9’’ with respect to the ICRF.

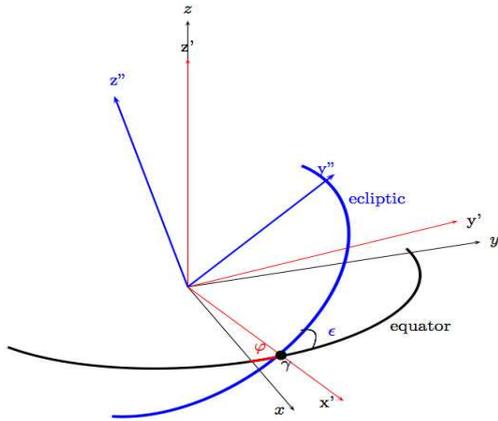


Fig. 1. Figure showing the coordinate transformation from the origin-equator of the ICRF (xyz axis in the figure) into the equinox-ecliptic ($x'y'z'$ in the figure) of the epoch. First, we proceed with the rotation $R_z(\varphi)$ (φ being the bias between the x -axis of the ICRF, and the equinox of the epoch, located at the vernal point γ). To obtain the ecliptic coordinates, we proceed with a second rotation $R_{x'}(\epsilon)$ (ϵ being the obliquity).

Table 3. Conversion parameters from the equatorial plane to the ecliptic J2000 (Simon 2011, priv. comm.).

Parameter	DE405/DE406	INPOP10a
φ	$-0''.05028$	$-0''.0518785$
ϵ	$23^\circ 26' 21''.40960$	$23^\circ 26' 21''.411361$

with:

$$R_z(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

and

$$R_{x'}(\epsilon) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \epsilon & \sin \epsilon \\ 0 & -\sin \epsilon & \cos \epsilon \end{pmatrix},$$

where ϵ is the obliquity, that is to say the angle between the Earth's equator and the ecliptic also known as the Earth's axial tilt, and φ is a longitude bias, since the origin of the ICRF does not correspond to the equinox of the epoch J2000.0.

The values of the parameters ϵ and φ , for the DE405/406 and INPOP10a ephemerides are given in Table 3 (Simon 2011, priv. comm.).

3. Results

For each ephemeris data set, we computed the inclination i and the longitude of the ascending node Ω of the invariable plane, with a time step of $1d$, with respect to both:

- the ICRF, by using Eqs. (1) to (8);
- the equinox-ecliptic of the epoch J2000.0, after applying the rotation given by Eq. (9).

We have distinguished two cases:

- A basic physical system including the Sun, the dwarf planet (134340) Pluto, and the eight planets (Souami & Souchay 2011). This system was the one considered by (Burkhardt 1982).
- The previous system, to which we added the dwarf planet (1) Ceres as well as the two asteroids (4) Vesta and (2) Pallas. This allows us to evaluate the effects of these three additional small bodies.

3.1. The basic system: the Sun, the eight planets, and Pluto

Our N -body system ($N = 10$) is defined as follows: the Sun, (134340) Pluto, and the eight planets, the Earth being replaced by the EMB. This N -body system is identical to the one considered in previous studies, hence, we investigate it and compare our results to (Burkhardt 1982).

3.1.1. Results at epoch J2000.0

In Table 4, we present our two sets of measurements of the orientation of the invariable plane at the epoch J2000.0, obtained by using both the DE405/DE406 and INPOP10a ephemerides, finding good agreement between them. In particular, when comparing the results obtained by using DE405 and INPOP10a, we find an agreement of up to 3 mas (milliarcseconds) for i and 37 mas for Ω with respect to the ICRF (origin-equator). The differences are probably due to the different values of the primary parameters used in the two numerical ephemerides (see Table 2).

As for the differences found between the results observed with respect to the ecliptic-equinox of J2000.0, the differences that we found here were amplified by the change in the determination of the parameters φ and ϵ . They are respectively 12 mas for i and 295 mas for Ω .

When comparing the results obtained by using the DE405 and DE406 ephemerides, we observe an agreement between them up to 0.1 mas and 0.01 mas for i with respect to both the ICRF and the ecliptic-equinox of the epoch J2000.0. For Ω , the agreement is as close as 0.02 mas and 0.16 mas.

The last two columns in Table 4 show the results obtained by (Burkhardt 1982), given with respect to the equator-equinox system of J2000.0, by using the precession matrix between B1950.0 and J2000.0. When comparing these results to ours, obtained with respect to the ICRF, we get large differences of $9''.8$ for i , and $1'14''$ for Ω . This can still be explained by the use of different ephemerides data sets with different values of the primary constants, but the large part of the difference is undoubtedly due to the use of a different reference plane used in the computations. In other words, the origin and equator of the ICRF do not coincide exactly with the equinox-equator.

3.1.2. Long-term accuracy of the determination of the invariable plane

The position and velocity vectors of each body, provided by the adopted numerical ephemerides, are subject to a limited precision. Moreover, neglecting bodies such as the largest asteroids induces some variations in the orientation of the invariable plane with respect to time, when ideally it should remain fixed as stated in Sect. 2. By studying the temporal variations in the invariable plane's orientation, we check the accuracy of its determination in the case of the basic system, with respect to both the ICRF and the ecliptic-equinox of the epoch J2000.0, over the entire available time span (Table 1) of each of the numerical ephemerides DE405, DE406, and INPOP10a, using a time step of $1d$. We show the results in Table 5. In particular, we give the maximum and minimum values of i and Ω , with respect to both the ICRF and the equinox-ecliptic of the epoch J2000.0. We also provide the value of the maximal variations in Δi and $\Delta \Omega$ in all cases. Here again, our results show a good agreement between INPOP10a and DE405/406.

Moreover, the amplitude of the temporal variations Δi (respectively $\Delta \Omega$) does not exceed 1.22 mas (503 mas, respectively)

Table 4. Inclination (i) and longitude of the ascending node (Ω) of the invariable plane with respect to the ICRF and the ecliptic-equinox of J2000.0, at the epoch J2000.0, in the case of the basic system.

	DE405 / DE406		INPOP10a		Burkhardt, 1982	
	Ecliptic-equinox	ICRF	Ecliptic-equinox	ICRF	Ecliptic-equinox	Equator-equinox
i	1°34'43''{33124/33124}	23°0'31''{98231/98232}	1°34'43''31903	23°0'31''97914	1°35'13''86	23°0'22''11
i (°)	1:{57870312/57870312}	23:{00888397/00888398}	1:57869973	23:00888309		
Ω	107°34'56''{17914/17898}	3°51'9''{45913/45911}	107°34'56''47403	3°51'9''42191	107°36'30''8	3°52'23''7
Ω (°)	107:{58227198/58227193}	3:{85262753/85262754}	107:58235389	3:85261719		

Table 5. Minimum and maximum values of the inclination i and longitude of the ascending node of the invariable plane, and the corresponding peak-to-peak temporal variations Δi and $\Delta\Omega$.

	DE405		DE406		INPOP10a	
	Ecliptic-equinox	ICRF	Ecliptic-equinox	ICRF	Ecliptic-equinox	ICRF
Minimal i	1°34'43''33115	23°0'31''98185	1°34'43''33064	23°0'31''97992	1°34'43''31883	23°0'31''97657
Minimal i (°)	1:57870309	23:00888384	1:57870295	23:00888331	1:57869967	23:00888238
Maximal i	1°34'43''33129	23°0'31''98321	1°34'43''33148	23°0'31''99351	1°34'43''32005	23°0'31''98120
Maximal i (°)	1:57870313	23:00888422	1:57870319	23:00888708	1:57870001	23:00888366
Δi (mas)	0.1419459	1.3645984	0.8424548	13.5924536	1.2217759	4.6309134
Minimal Ω	107°34'56''14530	3°51'9''45884	107°34'55''76351	3°51'9''45769	107°34'56''38804	3°51'9''41993
Minimal Ω (°)	107:58226	3:85262745	107:58215653	3:85262713	107:58233001	3:85261664
Maximal Ω	107°34'56''19574	3°51'9''45968	107°34'56''26643	3°51'9''46523	107°34'56''57119	3°51'9''42587
Maximal Ω (°)	107:58227	3:85262769	107:58229623	3:85262923	107:58238088	3:85261829
$\Delta\Omega$ (mas)	50.4331802	0.8459849	502.9163810	7.5364930	183.1441989	5.9418886

Notes. Results computed with respect to both the ICRF and the ecliptic-equinox of J2000.0.

with respect to the ecliptic-equinox J2000.0. The maximum amplitude of these variations with respect to the ICRF does not exceed 13.59 mas (7.53 mas, respectively).

With respect to the ICRF, we clearly observe a linear trend of i as a function of time, at a rate of $-2''.365252 \times 10^{-6}/y$ ($-2''.255406 \times 10^{-6}/y$, respectively) over the entire available time span of the ephemeris DE405 (Fig. 2(a)) and INPOP10a (Fig. 2(b)). Nevertheless, in the second case, a quadratic component is necessary to determine the closest fit to the curve. We note that the two slopes are of a negative sign and values very close to each other.

These linear behaviours can still be discerned with respect to the ecliptic-equinox of J2000.0 (Figs. 3(a), b), with slopes of positive sign and values close to each other, namely $8''.4037 \times 10^{-5}/y$ for the DE405 ephemeris (Fig. 3(a)) and $8''.9197 \times 10^{-5}/y$ for the INPOP10a ephemeris (Fig. 3(b)).

The temporal variations in Ω determined from the DE405 ephemeris over its 600 y time span, with respect to the origin-equator of the ICRF and the ecliptic-equinox of J2000.0 are plotted in Figs. 2(c), 3(c), respectively. In the first case, we observe that, the linear slope has a much lower absolute value ($1''.4096694 \times 10^{-6}/y$) with an opposite sign, than in the second case ($8''.40370 \times 10^{-5}/y$).

Moreover, when studying these temporal variations by using INPOP10a, we find that the signals are clearly dominated by a quadratic drift with respect to both the origin-equator of the ICRF (Fig. 2(d)) and the ecliptic-equinox of J2000.0 (Fig. 3(d)).

Finally, we study Δi and $\Delta\Omega$, when using the long-term Development Ephemeris DE406 (Standish 1998) over its 6000-year time span (Table 1), with respect to the ICRF. Results are plotted in Figs. 4 and 5, respectively. A linear behaviour is observed in both cases. With respect to the ICRF, the rate of Δi is evaluated to be $-2''.265424036 \times 10^{-6}/yr$, which is close to the

value found above with the INPOP10a ephemeris over its 2053 y time interval.

We confirm the linear behaviour of $\Delta\Omega$, already observed in Fig. 2(c) for DE405, but do not identify a quadratic component similar to that found for INPOP10a Fig. 2(d).

We note that (Burkhardt 1982), using the DE102 ephemeris over the time interval [1497, 2249], also identified a linear behaviour of the temporal variations of i and Ω of the invariable plane.

3.1.3. Short-term accuracy of the determination

In addition to the linear and quadratic components, we note in Figs. 2(a)–d and 3(a)–d the small temporal variations, at high frequencies, in the orientation of the invariable plane.

In Figs. 6 and 7, we show these variations over the 100 y time interval [1950.0, 2050.0], with respect to the ICRF. We note the very good agreement between the results obtained by using the DE405 and the INPOP10a ephemerides, for both Δi (Fig. 6) and $\Delta\Omega$ (Fig. 7).

Since the variations in i and Ω have the same profile, even when derived from two independent ephemerides, we deduce that they are probably induced by an imperfection in the computation of the total angular momentum, rather than in the ephemerides themselves. This is investigated in Sect.3.2.

3.2. A more complete system

If our ten-body system were an isolated system, its total momentum would be conserved and the values of the longitude of the ascending node Ω and the inclination i of the invariable plane would be constant over time. This is not the case as can be seen in Figs. 2(a)–d with respect to the ICRF, and Figs. 3(a)–d with

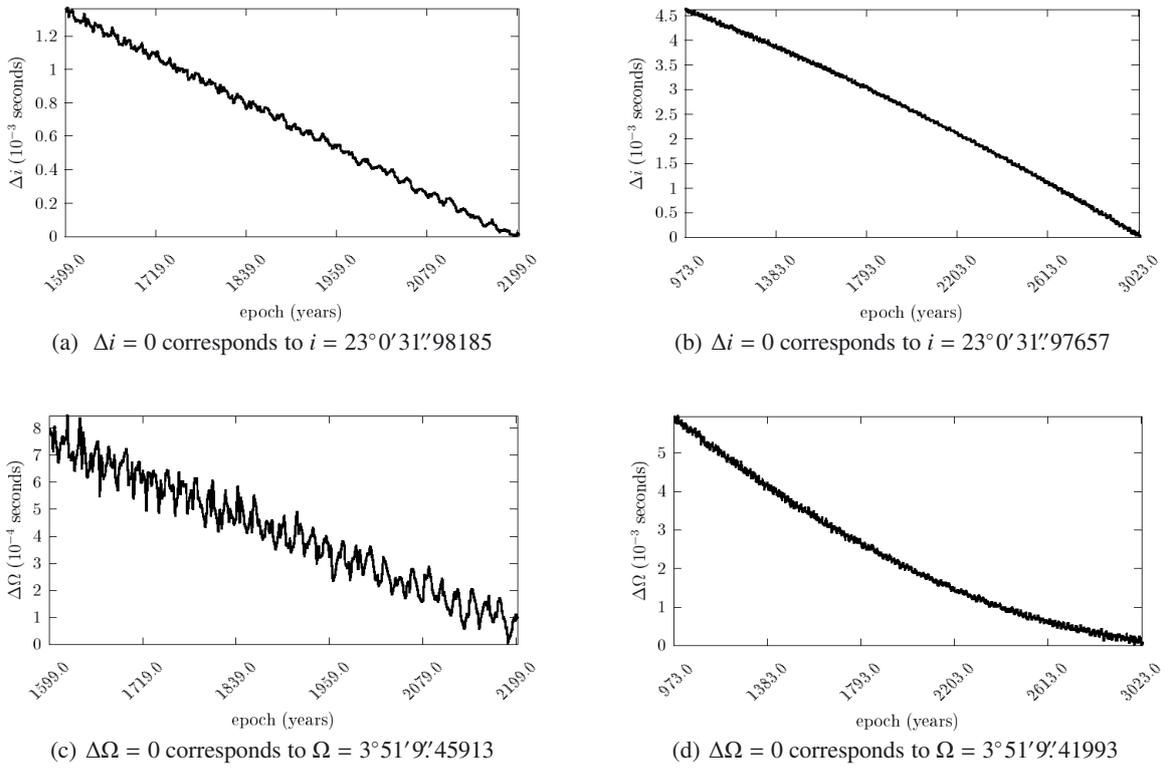


Fig. 2. Temporal variations Δi and $\Delta\Omega$ in the orientation of the *invariable plane* with respect to the ICRF, where Δi is given with respect to the equator of the ICRF by using DE405 **a)** and INPOP10a **b)**, where $\Delta\Omega$ is given with respect to the origin-equator of the ICRF by using of DE405 **c)** and INPOP10a **d)**.

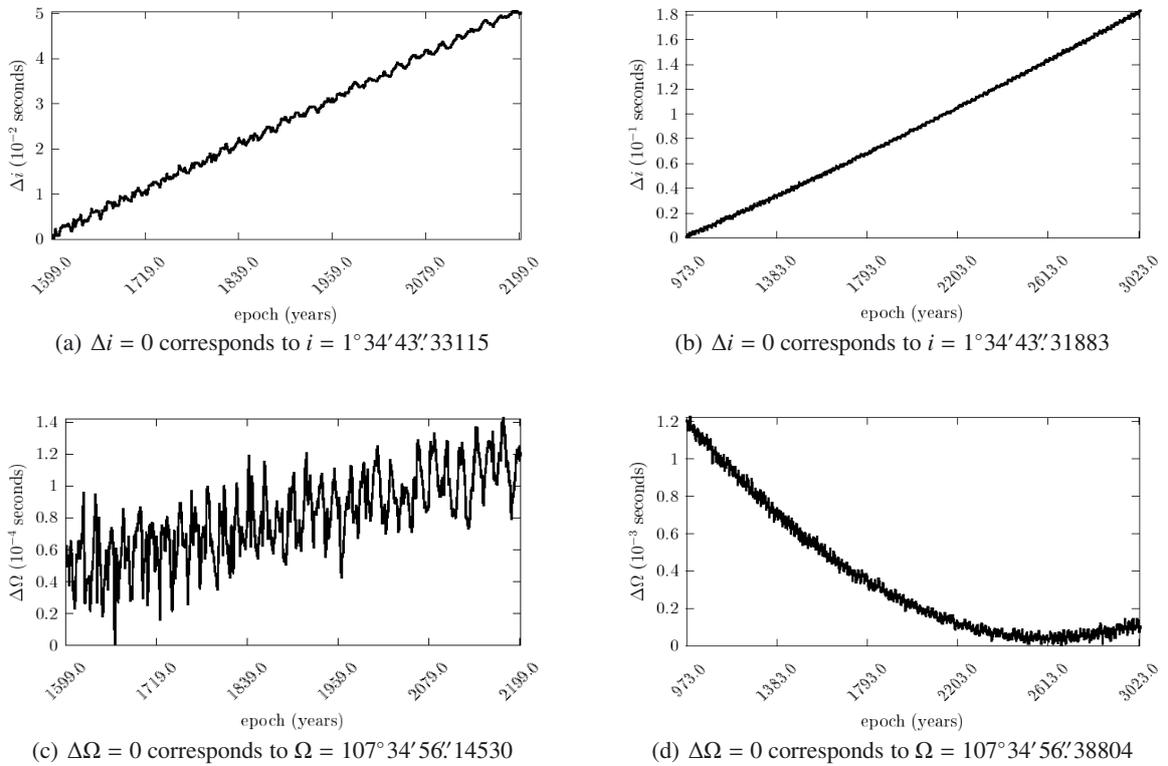


Fig. 3. Temporal variations Δi and $\Delta\Omega$ in the orientation of the *invariable plane* with respect to the equinox-ecliptic of the epoch J2000.0, where Δi is given with respect to the ecliptic of the epoch J2000.0 by using DE405 **a)** and INPOP10a **b)**, where $\Delta\Omega$ is given with respect to the ecliptic-equinox of the epoch J2000.0 by using of DE405 **c)** and INPOP10a **d)**.

Table 6. Minimum and maximum values of the inclination i and longitude of the ascending node of the invariable plane, and the corresponding peak-to-peak temporal variations Δi and $\Delta\Omega$.

Ephemeris	DE405		INPOP10a	
	Ecliptic-equinox	ICRF	Ecliptic-equinox	ICRF
Minimal i	1°34'43".34057	23°0'31".97900	1°34'43".32868	23°0'31".97526
Minimal i (°)	1:57870571	23:00888305	1:57870241	23:00888201
Maximal i	1°34'43".34061	23°0'31".97904	1°34'43".32877	23°0'31".97531
Maximal i (°)	1:57870572	23:00888306	1:57870243	23:00888203
Δi (mas)	3.8791×10^{-2}	3.86817×10^{-2}	8.71123×10^{-2}	5.1558×10^{-2}
Minimal Ω	107°34'56".21622	3°51'9".48165	107°34'56".52916	3°51'9".44489
Minimal Ω (°)	107:58228228	3:85263379	107:58236921	3:85262358
Maximal Ω	107°34'56".21762	3°51'9".48174	107°34'56".53142	3°51'9".44512
Maximal Ω (°)	107:58228267	3:85263381	107:58236983	3:85262364
$\Delta\Omega$ (mas)	1.40935	9.4064×10^{-2}	2.25413	2.28396×10^{-1}

Notes. Results computed with respect to both the ICRF and the ecliptic-equinox of J2000.0, over the time interval [1950.0,2050.0].

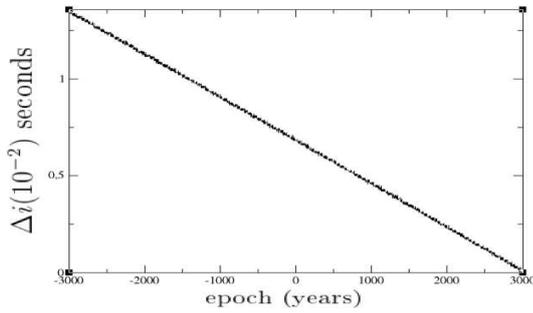


Fig. 4. Temporal variations in the inclination Δi of the invariable plane determined by using the DE406 ephemeris, with respect to the ICRF. $\Delta i = 0$ corresponds to $i = 23^\circ 0' 31''.97992$.

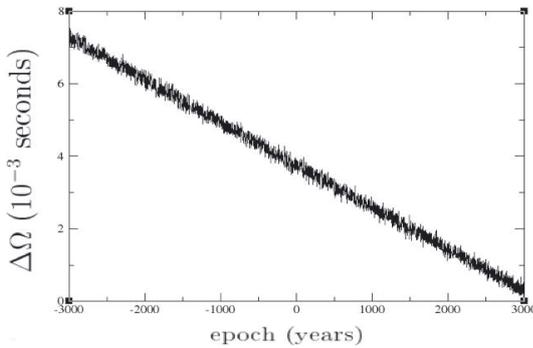


Fig. 5. Temporal variations in the longitude of the ascending node $\Delta\Omega$ of the invariable plane determined by using the DE406 ephemeris, with respect to the ICRF. $\Delta\Omega = 0$ corresponds to $\Omega = 3^\circ 51' 9''.45769$.

respect to the ecliptic-equinox of the epoch J2000.0. This is partially due to the uncertainties in the positions, velocities, and the masses of these bodies. This is also probably because, by considering only the planets, we have ignored the effect of smaller bodies, in particular the larger ones of the asteroid main belt. As previously stated in Sect. 2.3, (1) Ceres, (2) Pallas, and (4) Vesta were taken into account, being massive bodies, in the compilation of the numerical ephemerides DE405/406 (Standish 1998) and INPOP10a (Fienga et al. 2010; Kuchynka 2010). Thus, they should also be included in the computation of the total angular momentum of the system. The effect of these three bodies on the orientation of the invariable plane is investigated here.

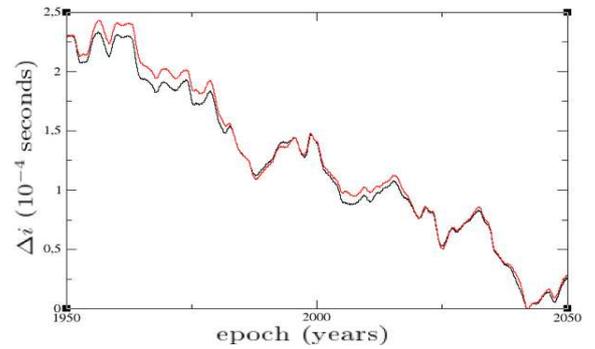


Fig. 6. Variation in the inclination Δi , over 100 y , with respect to the ICRF, in the case of the basic ten-body system (Sect. 3.1). Results for DE405 (in black) and INPOP10a (in red).

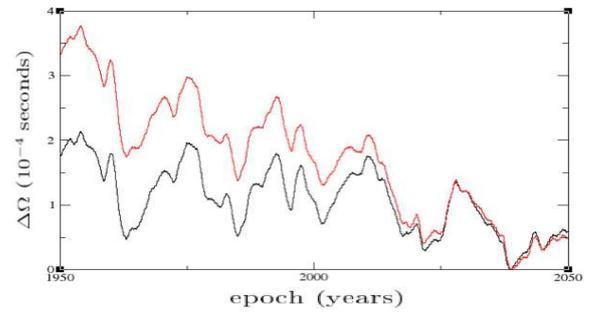


Fig. 7. Variation in the longitude of the ascending node $\Delta\Omega$, over 100 y , with respect to the ICRF, in the case of the basic ten-body system (Sect. 3.1). Results for DE405 (in black) and INPOP10a (in red).

For this purpose, we add to our previous basic system the three largest bodies of the asteroid main belt mentioned above and assess their effect on the orientation of the invariable plane. Thus, our 10-body system defined in Sect.3.1 becomes the following 13-body system: the Sun, the eight planets (the Earth being replaced by the Earth-Moon barycentre), the two dwarf planets (134340) Pluto and (1) Ceres, and the two asteroids (2) Pallas and (4) Vesta. Nevertheless, their positions and velocities are not directly available from the ephemerides.

Therefore, unlike the planetary ephemerides that were retrieved through the Access Direct files of Chebyshev polynomial fits to the cartesian positions and velocities of the planets,

Table 7. Inclination (i) and longitude of the ascending node (Ω) of the invariable plane with respect to the ICRF and ecliptic-equinox of J2000.0, at the epoch J2000.0, in the case of the more complete system.

	DE405		INPOP10a	
	Ecliptic-equinox	ICRF	Ecliptic-equinox	ICRF
i at J2000	1°34'43". 34038	23°0'31". 97893	1°34'.43". 32849	23°0'31". 97519
i (°) at J2000	1:57870 566	23:00888 303	1:57870 235	23:00888 199
Ω at J2000	107°34'56". 22262	3°51'9". 48107	107°34'56". 53619	3°51'9". 44433
Ω (°) at J2000	107:582 28062	3:8526 3363	107:582 37116	3:8526 2342

the Sun and the Moon, those of (1) Ceres, (2) Pallas, and (4) Vesta were collected from the IMCCE Ephemeris Web Server (IMCCE 2011).

This web server provides position ephemerides for the small bodies of the solar system by numerical integration, using the numerical planetary ephemerides mentioned above for the initial conditions of the massive bodies: the Sun, the planets (the Earth being replaced by the EMB), as well as the dwarf planet (134340) Pluto.

3.2.1. Results at the epoch J2000.0

Here, as in Sect. 3.1.1, we present the values of the orientation parameters i and Ω of the invariable plane at the epoch J2000.0, by taking into account the additional effects of (1) Ceres, (2) Pallas, and (4) Vesta, thus in the context of the more complete system.

The results obtained by using the DE405 and the INPOP10a ephemerides, with respect to both the origin-equator of the ICRF and the ecliptic-equinox of the epoch J2000.0 are given in Table 7.

Results with respect to the ICRF show the close agreement between the two ephemerides at the level of 4 mas for i , and 37 mas for Ω . As stated in Sect. 3.1.1, different primary body masses (see Table 2) were used in the compilation of the ephemerides. For instance, the masses of (1) Ceres, (2) Pallas, and (4) Vesta in $10^{-10} \times M_{\odot}$ unit are given to the first decimal in the case of DE405 ephemeris, whereas they are given to the fifth decimal in the case of the INPOP10a. This might explain the small differences found in the orientation, between the two ephemerides.

With respect to the ecliptic-equinox of the epoch J2000.0, these differences are larger: 12 mas for i and 314 mas for Ω . This was already the case for the basic planetary system seen in Sect. 3.1.1. The ICRF (origin-equator) to equinox-ecliptic transformation in Eq. (9) with the parameters given in Table 3 (Simon 2011, priv. comm.), is most likely the origin of these amplifications. We note that the four values above showing the differences between the DE405 and INPOP10a results, are quasi-identical to those found with the basic system (Sect. 3.1.1).

Finally, we compare the results of the orientation of the invariable plane obtained at the epoch J2000.0, when considering the basic system (Table 4), to those obtained when considering the more complete system (Table 7). The effect of the three additional bodies is of the order of 4 mas on i and 22 mas on Ω with respect to the ICRF, for both the DE405 and INPOP10a ephemerides; with respect to the equinox-ecliptic of the epoch J2000.0, this effect is instead found to be 9 mas for i for both ephemerides, and 43 mas (62 mas) for Ω with DE405 (INPOP10a, respectively).

3.2.2. Results over 100 years

We have studied in Sect. 3.1.3 small temporal variations in the orientation of the invariable plane over the 100 y time interval [1950.0, 2050.0], in the case of the basic system.

The purpose of this subsection is to study the specific influence of the three largest Main Belt Asteroid objects, over the 100 y considered, and evaluate the possible improvements in the conservation of the angular momentum vector when taking them into account.

We introduce (1) Ceres, (4) Vesta, and (2) Pallas, one after the other in this order, the most massive to the least massive (see Table 2), into our previous 10-body system. In each case, we evaluate the peak-to-peak variations in both i and Ω of the invariable plane, with respect to the ICRF, using both the DE405 and INPOP10a ephemerides, over the time interval [1950.0, 2050.0]. We report these values in Table 10.

In the case of the basic system, these variations are $2''.14 \times 10^{-4}$ and $3''.77 \times 10^{-4}$ for i in the case of DE405 and INPOP10a, respectively. After introducing the dwarf planet (1) Ceres we observe, over the same 100 y time interval, a considerable reduction to $0''.75 \times 10^{-4}$ and $0''.84 \times 10^{-4}$, that is to say an improvement by a factor of 2.85 for DE405 and 4.48 for INPOP10a.

In contrast, for Ω , we note a small increase in the variations for both DE405 and INPOP10a. This is shown in Figs. 9(a) and b, respectively.

Nevertheless, after introducing the asteroid (4) Vesta in addition to (1) Ceres (Table 10), we note a significant improvement for Ω . In the case of the DE405 (INPOP10a, respectively) ephemeris, the peak-to-peak value goes from $2''.33 \times 10^{-4}$ ($2''.43 \times 10^{-4}$, respectively) for the basic system, to $3''.44 \times 10^{-4}$ ($5''.15 \times 10^{-4}$, respectively) after introducing only (1) Ceres and decreases to $1''.10 \times 10^{-4}$ ($2''.41 \times 10^{-4}$, respectively) after introducing both Ceres and Vesta. As reported in (Laskar et al. 2011), the mutual interactions between Ceres and Vesta are so strong that the bodies cannot be considered individually when computing their orbits as well as their specific angular momentum.

Therefore, we believe this might explain the increase in the temporal variations of the longitude of the ascending node when considering only Ceres and neglecting Vesta in our computations.

After introducing the three bodies Ceres, Vesta, and Pallas together, the peak-to-peak temporal variations in Ω over the time interval [1950.0, 2050.0] continues to decrease significantly with values of $0''.94 \times 10^{-4}$ for DE405 and $2''.28 \times 10^{-4}$ for INPOP10a.

The improvement achieved by the introduction of the three additional bodies can be easily observed in Table 10, Figs. 8(a), b for i and Figs. 9(a), b for Ω . In particular, the linear drift decreases significantly. Moreover, we note that there is a systematic oscillation with a period of 18.6 y , which should correspond to the precession period of the lunar ascending node. This residual signal is probably a consequence of the use of

Table 8. Maximal and minimal contributions (in percentage) of each of the 13 bodies to the norm of the total angular momentum vector, evaluated over the 100 y time interval [1950,2050] for both of the DE405 and the INPOP10a ephemeris.

Bodies	DE405		INPOP10a	
	min	max	min	max
Sun	3.413946×10^{-4}	1.390732×10^{-1}	3.413967×10^{-4}	1.390732×10^{-1}
Mercury	2.784889×10^{-3}	2.949411×10^{-3}	2.784890×10^{-3}	2.949413×10^{-3}
Venus	5.806344×10^{-2}	5.970013×10^{-2}	5.806347×10^{-2}	5.970016×10^{-2}
Earth-Moon barycentre	8.510962×10^{-2}	8.686849×10^{-2}	8.510967×10^{-2}	8.686853×10^{-2}
Mars	1.113641×10^{-2}	1.129740×10^{-2}	1.113643×10^{-2}	1.129742×10^{-2}
Jupiter	61.368898	61.515754	61.368928	61.515784
Saturn	24.925657	24.957143	24.925643	24.957129
Uranus	5.406210	5.407393	5.406213	5.407396
Neptune	7.993727	7.994472	7.993719	7.994465
(134340) Pluto	1.273950×10^{-3}	1.274015×10^{-3}	1.261215×10^{-3}	1.261279×10^{-3}
(1) Ceres	2.195344×10^{-5}	2.213711×10^{-5}	2.222605×10^{-5}	2.241200×10^{-5}
(2) Pallas	4.562694×10^{-6}	4.599860×10^{-6}	5.082570×10^{-6}	5.123970×10^{-6}
(4) Vesta	5.600394×10^{-6}	5.653883×10^{-6}	5.735539×10^{-6}	5.790319×10^{-6}

Table 9. Inclinations and longitudes of the ascending nodes of the considered solar system bodies with respect to the invariable plane and ecliptic-equinox of J2000.0.

	$i(^{\circ})$				$\Omega(^{\circ})$			
	Invariable plane		Ecliptic-equinox		Invariable plane		Ecliptic-equinox	
	DE405	INPOP10a	DE405	INPOP10a	DE405	INPOP10a	DE405	INPOP10a
Mercury	6.3472858	6.3472876	7.0138861	7.0138846	32.2196517	32.2196761	48.1237505	48.1237432
Venus	2.1545441	2.1545480	3.3816623	3.3816620	52.3081499	52.3081811	76.6326812	76.6326727
The Earth	1.5717094	1.5717062	0.0118008	0.0118012	284.5053506	284.5054480	10.6180385	10.6166892
Mars	1.6311858	1.6311871	1.8474386	1.8474388	352.9528964	352.9530452	49.4741336	49.4741195
Jupiter	0.3219652	0.3219657	1.3042508	1.3042472	306.9167004	306.9169730	100.4850212	100.4850283
Saturn	0.9254704	0.9254848	2.4859253	2.4859357	122.2651836	122.2652654	113.6519989	113.6521532
Uranus	0.9946692	0.9946743	0.7722317	0.7722266	308.4427476	308.4428683	73.9992219	73.9988116
Neptune	0.7354155	0.7354109	1.7701940	1.7701783	189.2848872	189.2858832	131.7830269	131.7832001
(134340) Pluto	15.5541473	15.5540987	17.1405780	17.1405259	107.0600642	107.0601401	110.3012095	110.3012757
(1) Ceres	9.1974873	9.1974921	10.6166581	10.6166586	73.5541236	73.5541321	81.2542096	81.2542086
(2) Pallas	34.4340071	34.4340066	35.0629114	35.0629112	172.5129883	172.5129914	173.9695929	173.9695925
(4) Vesta	5.5831363	5.5831401	7.1313625	7.1313627	100.1146622	100.1146572	104.3314594	104.3314629

Table 10. Maximal temporal variations (peak-to-peak) in both Δi and $\Delta \Omega$ of the invariable plane, with respect to the ICRF, over the time interval [1950.0, 2050.0].

M.B.O	INPOP10a		DE405	
	$\Omega(^{\circ}10^{-4})$	$i(^{\circ}10^{-4})$	$\Omega(^{\circ}10^{-4})$	$i(^{\circ}10^{-4})$
none	2.43	3.77	2.33	2.14
C	5.15	0.84	3.44	0.75
CV	2.41	0.67	1.10	0.58
CVP	2.28	0.51	0.94	0.38

Notes. We consider the following cases: none, of a basic system with no MBO (Main Belt Object); C where we add Ceres; CV where we add Ceres and Vesta; and CVP representing the more complete system.

the EMB instead of taking into account the Earth and the Moon separately in the ephemerides.

We note that despite this oscillation, the peak-to-peak variations, with the values given above, are smaller than 1 mas for Δi and 3 mas for $\Delta \Omega$. This proves the remarkable accuracy of determination of the invariable plane.

3.2.3. Analysis of the individual contributions

We continue our analysis by evaluating the individual contributions (in terms of percentage) of each of the bodies involved in the computation of the norm of the total angular momentum. For each ephemeris and each body, we give the minimum and maximum values of this contribution, evaluated over the time interval [1950.0, 2050.0]. Results are presented in Table 8 for each of the 13 bodies of the complete system.

The contribution of Jupiter with mass $M_{\odot}/1047.3486$ and $M_{\odot}/1047.348644$, respectively, for DE405 and INPOP10a in Table 2, varies between 61.368% and 61.515% with an agreement up to the third decimal between the two ephemerides used. For Saturn of mass $M_{\odot}/3497.888$ ($M_{\odot}/3497.9018$, respectively), for the DE405 (respectively INPOP10a), the contribution varies between 24.925% and 24.957% with agreement to the fourth decimal.

For the other planets, the masses used in DE405 and INPOP10a are close to each other up to the seventh digit as can be seen in Table 2. As a consequence, we find good agreement

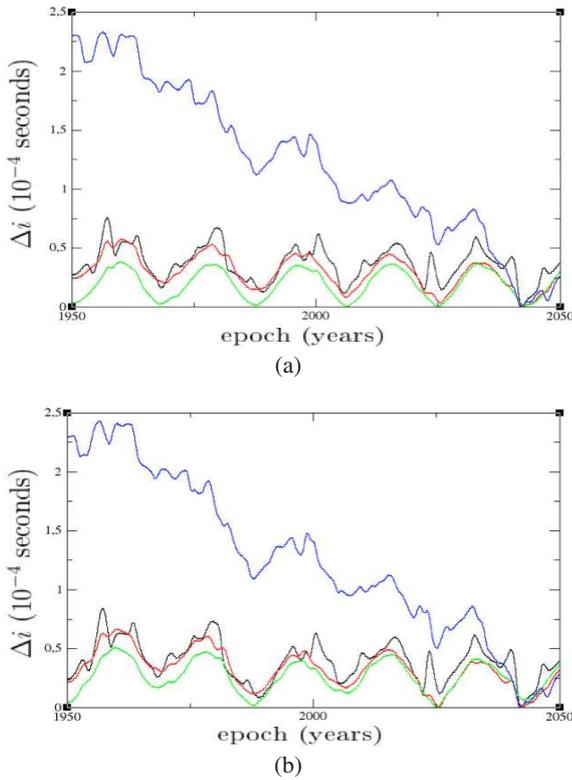


Fig. 8. Temporal variations Δi in the invariable plane with respect to the equator of the ICRF. **a)** For DE405. **b)** For INPOP10a. In blue, the basic system; in black, the basic system + Ceres; in red, the basic system + Ceres and Vesta; in green, the more complete system.

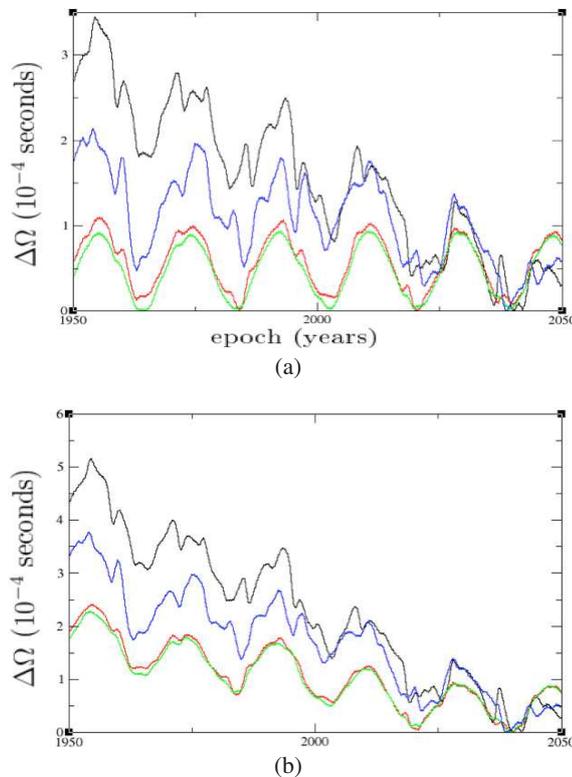


Fig. 9. Temporal variations $\Delta\Omega$ with respect to the ICRF. **a)** For DE405. **b)** For INPOP10a. In blue: the basic system; in black: the basic system + Ceres; in red: the basic system + Ceres and Vesta; in green: the more complete system.

in their respective contributions to the norm of the total angular momentum (see Table 10). As for the EMB its contribution varies between $8.5109 \times 10^{-2}\%$ and $8.6868 \times 10^{-2}\%$. The Sun's contribution varies between $3.4139 \times 10^{-4}\%$ and $1.3907 \times 10^{-1}\%$ with a good agreement between INPOP10a and DE405, up to the fifth decimal for the EMB, and the fourth decimal for the Sun.

We also investigated the contributions of the other bodies of the system, i.e. the two dwarf planets (134340) Pluto and (1) Ceres, as well as the two asteroids (2) Pallas and (4) Vesta. For these bodies, the masses used by the INPOP10a ephemeris are greater than those used by the DE405 ephemeris: 1% for (134340) Pluto, 1.2% for (1) Ceres, 11.3% for (2) Pallas, and 2.4% for (4) Vesta. Ceres's contribution is about $2 \times 10^{-5}\%$, and Vesta's $5 \times 10^{-6}\%$ for both ephemerides, which are roughly 130 and 520 times smaller than Mercury's contribution, respectively.

3.3. Inclinations and longitudes of the ascending nodes of the planets with respect to the invariable plane

As the fruit of a long tradition dating back to the 18th century, the ecliptic is nearly systematically chosen as the reference plane to determine the orbital elements i , Ω , $\tilde{\omega}$, and λ of a planet or any other moving object in the solar system (dwarf planet, asteroid, comet). Nevertheless, as we have pointed out in previous sections, the choice of adopting the ecliptic is not motivated by any physical reason, when globally studying the dynamical evolution of the solar system: it only concerns the Earth's motion (or the EMB's) around the Sun. We have seen in Sect. 3.2.3 that the EMB's contribution to the total angular momentum of the solar system oscillates between 0.085% and 0.087%. Moreover, the ecliptic is a slightly moving plane and using it to define orbital parameters suggests that we choose this plane at a given epoch, i.e. J2000.0 as has it commonly been used for approximately three decades.

In contrast, the invariable plane has two fundamental advantages inherent to its definition: first, it is fixed with respect to an inertial reference frame, as the ICRF in its more recent ICRF2 version (Ma et al. 2009). Thus, we have shown in the previous sections that its orientation with respect to the ICRF is very accurate, at least over the considered time interval [1950,2050]. Second, from its proper definition, the invariable plane represents dynamically the ideal reference plane to which one should refer to, for the orbit positioning of moving objects. In particular, it corresponds *a priori* to the plane for which statistically the orbital planes of moving objects are the closest, even when taking into account long-term resonant problems which should lead to high inclinations. To illustrate this property, we show in Table 8 the inclinations of the 12 bodies (planets, (134340) Pluto, (1) Ceres, (2) Pallas, and (4) Vesta) taken into account in our study when using either DE405 or INPOP10a. We note that for all the bodies (except for the Earth, of course), the inclination with respect to the invariable plane is smaller than the inclination with respect to the ecliptic. This is in particular the case for Jupiter and Saturn, for which the inclinations are $0^\circ.3219$ and $0^\circ.9254$ instead of $1^\circ.3042$ and $2^\circ.4859$, respectively.

4. Conclusions

The *invariable plane* of the solar system is defined as the plane perpendicular to its total angular momentum vector and passing through its barycentre. Thus, it seems to be the natural reference plane for the study of solar system bodies. It has not been the subject of any detailed studies since (Burkhardt 1982). With the adoption of a new International Celestial Reference

System (ICRS) and Frame (ICRF) (see [Ma et al. 1998, 2009](#)), as well as the most recent planetary ephemerides, it seems judicious to redetermine the orientation of the *invariable plane*.

1. We have improved the determination of the orientation of the solar system's invariable plane with respect to both the origin-equator of the ICRF and the equinox-ecliptic of the epoch J2000.0, relative to previous studies ([Burkhardt 1982](#)). To achieve this, we have used the two different long-term numerical ephemerides DE405 ([Standish 1998](#)) and INPOP10a ([Fienga et al. 2010](#)). Results obtained in both cases show quite a good agreement between the two ephemerides.
2. We have studied the influence of the dwarf planets ((134340) Pluto and (1) Ceres) and the large asteroids ((2) Pallas and (4) Vesta) on the orientation and the accuracy of the determination of the *invariable plane*, showing a clear improvement when they are taken into account.
3. We have also computed the individual contributions of the 13 bodies considered, namely the Sun, the eight planets (the Earth being replaced by the Earth-Moon barycentre), the two dwarf planets (134340) Pluto and (1) Ceres as well as the two asteroids (2) Pallas and (4) Vesta, when evaluating the total angular momentum.
4. Moreover, we have computed the inclination and the longitude of the ascending node of the planetary orbits at the epoch J2000.0, with respect to both the invariable plane and the mean ecliptic-equinox of the epoch J2000.0. In particular, we have shown that all the inclinations are smaller in the first case, except of course for the Earth.
5. Finally, our most accurate estimate of the orientation of the invariable plane with respect to the ICRF is given by an inclination of $23^{\circ}0'31''9$ and a longitude of the ascending node of $3^{\circ}51'9''.4$. In contrast, with respect to the ecliptic-equinox of J2000.0, the orientation is given by an inclination of $1^{\circ}34'43''.3$ and a longitude of the ascending node of $107^{\circ}34'56''$.

We assert that this determination of the invariable plane is of fundamental interest to solar system studies, in particular in the improvement of the determination of planet's and satellites' rotational elements as suggested by the IAU/IAG *Working Group*

on Cartographic Coordinates and Rotational Elements in 2006 ([Seidelmann et al. 2007](#)) and in the report of WGCCRE 2009 ([Archinal et al. 2011](#)).

Acknowledgements. We would like to thank Gerard Francou (SYRTE) as well as Jean Louis Simon (IMCCE) for providing us with numerical ephemeris data. We also thank Pierre Teyssandier (SYRTE) and Sebastien Bouquillon (SYRTE) for their valuable comments.

References

- Archinal, B. A., A'Hearn, M. F., Conrad, A., et al. 2011, *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 110, 401
- Brouwer, D., & Clemence, G. M. 1961, *Meth. Celestial Mech.*
- Brumberg, V. A. 1991, *Essential relativistic celestial mechanics*
- Burkhardt, G. 1982, *A&A*, 106, 133
- Clemence, G. M., & Brouwer, D. 1955, *AJ*, 60, 118
- De Laplace, P. S. 1878, *Oeuvres complètes de Laplace*, 11, 548
- Fienga, A., Manche, H., Kuchynka, P., Laskar, J., & Gastineau, M. 2010 [[arXiv: 1011.4419](#)]
- IMCCE 2011, Ephemeris generator
- Innes, R. T. A. 1920, *Circular of the Union Observatory Johannesburg*, 50, 72
- Kuchynka, P. 2010, *Étude de perturbations induites par les astéroïdes sur les mouvements des planètes et des sondes spatiales autour du point de Lagrange l_2*
- Kuchynka, P., Laskar, J., Fienga, A., & Manche, H. 2010, *A&A*, 514, A96
- Lieske, J. H. 1979, *A&A*, 73, 282
- Lieske, J. H., Lederle, T., Fricke, W., & Morando, B. 1977, *A&A*, 58, 1
- Laskar, J., Gastineau, M., Delisle, J.-B., Farrés, A., & Fienga, A. 2011, *A&A*, 532, L4
- Luzum, B., Capitaine, N., Fienga, A., et al. 2011, *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 30
- Ma, C., Arias, E. F., Eubanks, T. M., et al. 1998, *AJ*, 116, 516
- Ma, C., Arias, E. F., Bianco, G., et al. 2009, *IERS Technical Note*, 35, 1
- See, T. J. J. 1904, *Astron. Nachr.*, 164, 161
- Seidelmann, P. K., Archinal, B. A., A'Hearn, M. F., et al. 2007, *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 98, 155
- Souami, D., & Souchay, J. 2011, in *The Invariable Plane of the Solar system: a natural reference frame in the study of the dynamics of solar system bodies*, Proc. Journées 2011 Systèmes de Référence Spatio-temporels
- Standish, E. M. 1998, *Jpl planetary and lunar ephemerides, de405/le405*, JPL IOM 312F 98 048
- Standish, E. M., Jr., Keesey, M. S. W., & Newhall, X. X. 1976, *JPL Development Ephemeris number 96*
- Tremaine, S., Touma, J., & Namouni, F. 2009, *AJ*, 137, 3706

ANNEXE C

ANNEXE RELATIVE AUX CHAPITRES CONCERNANT LA DYNAMIQUE

C.1 Paramètres physiques

Je donne (Table C.1) les paramètres physiques utilisés dans les chapitres 3 et 4.

TAB. C.1:

Constante	Description	en masse solaire
M_{\odot}	Masse du Soleil	1
M_{Me}	Masse de Mercure	$1,660\,1368 \times 10^{-7}$
M_{Ve}	Masse de Venus	$2,447\,8383 \times 10^{-6}$
M_E	Masse de la Terre	$3,003\,4896 \times 10^{-6}$
M_{Ma}	Masse de Mars	$3,227\,1514 \times 10^{-7}$
M_J	Masse de Jupiter	$9,545\,9429 \times 10^{-4}$
M_{Sa}	Masse de Saturne	$2,858\,154 \times 10^{-4}$
M_U	Masse d'Uranus	$4,365\,785 \times 10^{-5}$
M_N	Masse de Neptune	$5,150\,313 \times 10^{-5}$
M_{Ceres}	Masse de (1) Cérès	$4,7 \times 10^{-10}$
M_{Pallas}	Masse de (2) Pallas	$1,0 \times 10^{-10}$
M_{Vesta}	Masse de (4) Vesta	$1,3 \times 10^{-10}$

C.2 Effets dissipatifs

Depuis environ deux décennies, plusieurs effets dissipatifs sont présentés comme responsables du transport des astéroïdes de la ceinture principale vers l'intérieur du système solaire. Ces effets non-gravitationnels tels que les effets Yarkowsky et YORP, ont été l'objet de plusieurs études [Rubincam, 1995], [Vokrouhlicky, 1998], [Vokrouhlický, 1999], [Brož, 2006],... L'impact de l'effet Yarkowsky par exemple est de l'ordre 10^{-8} au/Myr pour les comètes et 10^{-14} au/Myr pour les astéroïdes.

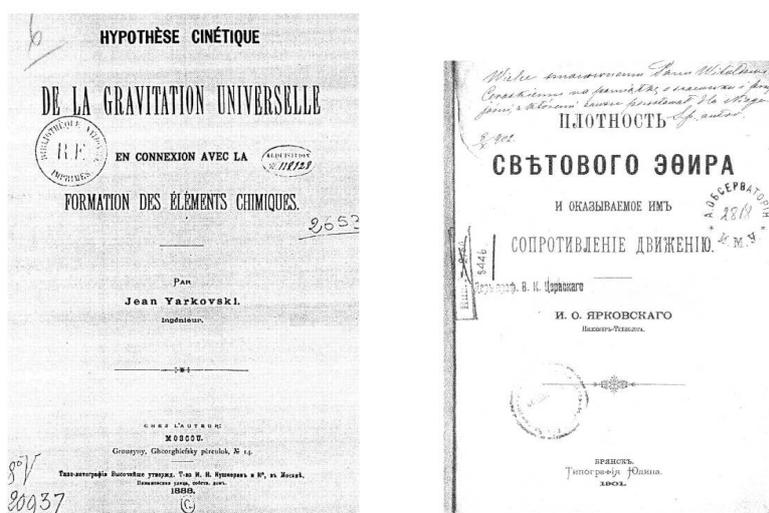
La question de l'existence d'effets non-gravitationnels dans le système solaire se pose depuis près de cinq siècles maintenant [Brož, 2006]. Je donne ici quelques dates parmi les plus importantes qui ont conduit à émettre l'hypothèse de l'existence d'effet de pression de radiation sur des objets du système solaire :

1. Vers l'an 1540, le mathématicien et astronome Pater Apian (1495-1552) et Girolamo Fracastoro (1478-1553) remarquent, de manières indépendantes, que les queues des comètes sont orientées dans la direction opposée au soleil.
2. En 1873, James Clerk Maxwell (1831-1879) déduit à partir de sa théorie de l'électromagnétisme l'existence d'une pression qui s'exercerait sur les comètes et serait à l'origine de leurs chevelures.



FIG. C.1: Ivan Osipovich Yarkovsky (1844-1902)

3. Ivan Osipovich Yarkovsky (1844-1902), ingénieur russo-polonais décrit un effet non-gravitationnels qui expliquerait le phénomène. Le concept décrivant cet effet non gravitationnel bien qu'ayant évolué, porte aujourd'hui son nom, *l'effet Yarkovsky*. Il décrira ce phénomène dans un pamphlet, plus communément connu sous le nom de *Pamphlet de Yarkovsky*, qui fera l'objet d'une publication privée en 1901 [Brož, 2006],[Beekman, 2006]. Il semblerait cependant que la première publication sur l'effet Yarkowsky, rédigée par Yarkowsky lui-même, l'ait été en français
4. En 1951, Ernst Julius Öpik (1893-1985) décrit une force conséquence d'une radiation thermique anisotropique. Puis en 1952, ici encore de manière indépendante, l'astronome russe Vladimir Vyacheslavovich Radzievskii (1911-2003) décrit le même phénomène.
5. Des variations orbitales observées pour l'orbite du satellite artificiel LAGEOS sont expliquées grace à l'effet Yarkowsky [Rubincam, 1987], [Rubincam et al., 1987], en 1987.
6. Une composante saisonnière pour l'effet Yarkowsky est introduite par [Rubincam, 1995].
7. L'effet Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack YORP est introduit [Rubincam and Bottke, 2000]. Cet effet induit le changement de l'obliquité de l'objet évalué dans [Rubincam, 2000].
8. L'effet Yarkowsky a été mesuré pour la première fois sur un objet du système solaire, l'astéroïde (6489) Golevka [Chesley et al., 2003] du groupe Apollo.



(a) *Hypothèse cinétique* publiée en Français en 1888 (disponible à la bibliothèque de l’Observatoire de Paris)

(b) *Pamphlet de Yarkovsky* (image trouvée sur internet).

FIG. C.2: Pages de gardes des publications d’Ivan Osipovich Yarkovsky, où il parle d’effets dissipatifs.

Depuis la confirmation de l’existence d’un tel effet sur la population des NEAs [Chesley et al., 2003] puis sur les astéroïdes de la ceinture principale [Nesvorný and Bottke, 2004]; il n’est plus envisageable d’aborder la question de la dynamique des petits corps du système solaire à long terme sans introduire des effets non-gravitationnels [Brož et al., 2006]. L’expression de ces effets étant étroitement liée à la taille D des objets, en $\propto 1/D$ ¹, ils sont d’autant plus importants sur les plus petits corps : l’effet Poynting-Roberstson par exemple domine pour les particules de taille comprise entre $\sim 1 \mu\text{m}$ et $\sim 1 \text{cm}$ [Vokrouhlický et al., 2005], alors que l’effet Yarkowsky domine pour les corps de taille comprise entre $\sim 10 \text{cm}$ et $\sim 40 \text{km}$ [Bottke et al., 2006].

D’autres effets sont également considérés pour l’étude des petits corps, tel que l’effet YORP (Yarkovsky-O’Keefe-Radzievskii-Paddack). Cet effet a été observé sur quelques NEAs : (25143) Itokawa [Vokrouhlický et al., 2004], (1620) Geographos [Durech et al., 2008] ou encore l’astéroïde (54509) 2000 PH5² [Lowry et al., 2007]. Depuis, plusieurs observations de ces objets ont confirmées l’existence de l’effet physique.

Je donne table C.2 les ordres de grandeurs des accélérations pour les divers effets non-gravitationnels intervenant dans la dynamique des petits objets (entre 10 cm et 10 km) du système solaire, pour un $GM_{\odot} = 1$. Nous pouvons comparer ces valeurs pour les effets non-gravitationnels à celles des effets gravitationnels des planètes $GM_{planete} \sim 10^{-3}$ et des plus gros astéroïdes $GM_{ast} \leq 10^{-9}$ [Brož et al., 2006]. Il est clair à partir de cette table que les deux effets non-gravitationnels dominants sont les effets Yarkowsky et YORP.

Il n’est pas envisageable aujourd’hui d’aborder la question de la dynamique à long terme des

¹la force étant proportionnelle à la superficie et la masse $\propto D^3$, l’accélération est par conséquent en $\propto 1/D$

²qui depuis porte le nom de (54509) YORP

accélération	radiale	transverse
gravité	$GM_{\odot} = 1$	
effets Yarkowky/YORP	10^{-7} à 10^{-11}	10^{-8} à 10^{-12}
pression de radiation	10^{-6} à 10^{-11}	
effet Poynting-Robertson		10^{-10} à 10^{-15}
vent solaire	$< 10^{-15}$	

TAB. C.2: Ordres de grandeurs relatifs (avec $GM_{\odot} = 1$) des accélérations radiales et transverses pouvant affecter les corps de petites tailles (entre 10 cm et 10 km). [Brož et al., 2006]

petits corps du système solaire sans introduire des effets non-gravitationnels [Brož et al., 2006] ; les effets Yarkowsky et YORP étant les deux effets dominants (Table C.2). En étudiant "l'évolution" de soixante dix membres de la famille Karin, Nesvorný et Bottke arrivent à identifier l'impact de l'effet dissipatif sur l'évolution des astéroïdes considérés [Nesvorný and Bottke, 2004]. Cette étude permettra également de valider le modèle linéaire de l'effet Yarkowsky [Vokrouhlický, 1999], qui est utilisé dans cette thèse.

Ces effets interviennent dans l'étude de la dissipation des familles d'astéroïdes [Bottke et al., 2001], par exemple la dérive en demi-grand axe est évalué à $|da/dt| \sim 2 \times 10^{-5}$ au/Myr pour les astéroïdes de diamètre $D = 5$ km et à $|da/dt| \sim 6 \times 10^{-6}$ au/Myr pour $D = 20$ km [Bottke et al., 2001]. Ils sont également évoqués comme une explication probable pour justifier le transport vers les zones de résonances et surtout comme à l'origine de l'existence NEAs (transport depuis la ceinture principale) [Morbidelli and Vokrouhlický, 2003].

C.2.1 Effet Yarkowsky

Il est l'effet non-gravitationnel dominant (Table C.2), conséquence de l'émission anisotrope des radiations solaires.

Nous pouvons distinguer deux composantes de l'effet Yarkowsky [Rubincam, 1995], [Rubincam, 1998], [Vokrouhlický, 1999], [Brož, 2006] une "diurne" fonction de la fréquence de rotation du corps (ω_{rot}) autour de son axe instantané de rotation, l'autre dite "saisonnière" fonction de la fréquence de moyen mouvement (ω_{rev}) ou de révolution du corps autour du Soleil.

L'effet diurne engendre une augmentation ou une diminution du demi-grand axe ; il est maximal pour une obliquité nulle. Dans le cas saisonnier, il en résulte tout le temps une diminution du demi-grand axe et l'effet est maximal pour une obliquité égale à 90° ,

Dans le modèle adopté ici et développé dans [Vokrouhlický, 1999] dans le cadre d'une théorie linéaire décrivant la radiation thermique, du corps en orbite et en rotation autour de son axe de rotation, les hypothèses sont les suivantes :

- la température à la surface du corps est supposée quasi-constante (petites variations de la température), $T = T_{av}$. Cette dernière est normalisée³ $T'_{av} = \frac{T_{av}}{T_*} = \frac{1}{2}$ (voir [Rubincam, 1995], [Rubincam, 1998]). T_* définie par $\epsilon\sigma T_*^4 = \alpha\mathcal{E}_*$, avec :

³Toutes les notations adoptées ici sont celles de [Vokrouhlický, 1999]. Toutes les quantités dénotées avec un symbole *prime* sont des quantités normalisées.

ε : est l'émissivité thermique de la surface,
 α : le coefficient d'absorption optique,
 σ : la constante de Stefan-Boltzmann
 et \mathcal{E}_* : le flux de radiation solaire évalué à la distance héliocentrique moyenne le long de l'orbite. On écrira Φ , le coefficient de force de radiation :

$$\Phi = \frac{\varepsilon_* \pi R^2}{mc} \quad (C.1)$$

m est la masse du corps et c la vitesse de la lumière dans la vide.

- Le corps est supposé sphérique de rayon R et d'obliquité γ . On notera $l_s = \sqrt{\frac{K}{\rho C \omega_{rev}}}$ la profondeur de pénétration de l'onde thermique, avec :

K la conductivité thermique,

C la capacité thermique

et ρ la densité volumique du corps.

on notera ainsi $R' = \frac{R}{l_s}$.

- Le paramètre thermique Θ :

$$\Theta = \frac{\Gamma \sqrt{\omega}}{\varepsilon \sigma T_*^3} \quad (C.2)$$

caractéristique de la relaxation entre l'absorption et la réémission des photons. $\Gamma = \sqrt{\rho C K}$ est l'inertie thermique. On écrira le paramètre χ^4 comme suit :

$$\chi = \frac{\Theta}{\sqrt{2R'}} \quad (C.3)$$

En moyennant sur une révolution, L'accélération de l'effet Yarkowsky diurne moyenné sur une révolution s'écrit :

$$\left(\frac{da}{dt} \right)_d = - \frac{8\alpha}{9\omega_{rev}} \frac{\Phi}{1+\chi} E_{R'} \sin \delta_{R'} \cos \gamma \quad (C.4)$$

et pour l'effet saisonnier :

$$\left(\frac{da}{dt} \right)_s = \frac{4\alpha}{9} \frac{\Phi}{\omega_{rev}} \frac{E_{R'} \sin \delta_{R'}}{1+\chi} \sin^2 \gamma \quad (C.5)$$

où $E_{R'} \sin \delta_{R'}$ est fonction de R' (équations (19) à (23) dans [Vokrouhlický, 1999]).

Ici nous considérons la composante radiale de l'effet Yarkowsky, qui entraîne une variation séculaire du demi-grand axe. Cependant il existe aussi une composante transverse qui, elle, agit sur l'inclinaison du corps.

⁴ χ est noté λ dans [Vokrouhlický, 1998]

C.2.2 Effet YORP

L'effet YORP est souvent décrit comme le second ordre de l'effet Yarkowsky. Ceci se justifie par les causes qui sont identiques pour les deux effets. Les conséquences quant à elles ne sont pas les mêmes, l'effet YORP agissant sur la période de rotation et l'obliquité du corp. Il est très sensible à la forme de ce dernier, une théorie analytique est présentée [[Nesvorný and Vokrouhlický, 2008](#)]. Dépendant de plusieurs paramètres physiques (diamètre, forme, paramètres thermiques, obliquité ...) inconnus, il ne sera pas considéré dans le travail présenté dans cette thèse.

B. Carry [[Carry, 2012](#)] fait l'état des lieux de nos connaissances actuelles des paramètres physiques de densité et de diamètre, pour les 287 objets les mieux connus seul 1/3 d'entre eux ont une densité connue avec une erreur inférieure à 20% et 2/3 une erreur inférieure à 50%.

ANNEXE D

DONNÉES SMBAS

D.1 Liste des images utilisées pour la première nuit

TAB. D.1: Liste des images pour le Chip 0 ;
centré en $\alpha = 22 : 42 : 35.79211188$, $\delta = -07 : 30 : 45.2322$

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00118530.fits	W-J-B	52519.266795	2.2280	26.114	109.486
SUPA00118540.fits	W-J-B	52519.268843	2.1790	26.769	109.854
SUPA00118550.fits	W-C-RC	52519.276127	2.0240	29.086	111.206
SUPA00118560.fits	W-C-RC	52519.278175	1.9840	29.731	111.598
SUPA00118570.fits	W-C-RC	52519.280221	1.9470	30.378	111.999
SUPA00118580.fits	W-C-RC	52519.282270	1.9110	31.023	112.406
SUPA00118590.fits	W-C-RC	52519.285021	1.8660	31.884	112.964
SUPA00118600.fits	W-C-RC	52519.287073	1.8340	32.524	113.388
SUPA00118610.fits	W-C-RC	52519.289125	1.8040	33.164	113.819
SUPA00118630.fits	W-C-RC	52519.293218	1.7460	34.430	114.703
SUPA00118640.fits	W-C-RC	52519.295304	1.7190	35.073	115.165
SUPA00118650.fits	W-C-RC	52519.297387	1.6930	35.712	115.636
SUPA00118660.fits	W-C-RC	52519.299434	1.6680	36.338	116.107
SUPA00118670.fits	W-C-RC	52519.301483	1.6450	36.961	116.588
SUPA00118680.fits	W-C-RC	52519.303531	1.6220	37.581	117.077
SUPA00118690.fits	W-C-RC	52519.305580	1.6000	38.199	117.576
SUPA00118700.fits	W-C-RC	52519.307629	1.5790	38.815	118.086
SUPA00118710.fits	W-C-RC	52519.309677	1.5590	39.427	118.606
SUPA00118720.fits	W-C-RC	52519.311726	1.5390	40.036	119.136
SUPA00118730.fits	W-C-RC	52519.313774	1.5210	40.642	119.677
SUPA00118740.fits	W-C-RC	52519.315823	1.5030	41.245	120.229
SUPA00118750.fits	W-C-RC	52519.317871	1.4860	41.844	120.792
SUPA00118760.fits	W-C-RC	52519.319920	1.4690	42.441	121.369
SUPA00118770.fits	W-C-RC	52519.321969	1.4530	43.032	121.957
SUPA00118780.fits	W-C-RC	52519.324017	1.4380	43.621	122.558

La suite, page suivante ...

ANNEXE D. DONNÉES SMBAS

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00118800.fits	W-J-B	52519.330708	1.3910	45.514	124.616
SUPA00118810.fits	W-J-B	52519.332755	1.3780	46.084	125.276
SUPA00118820.fits	W-C-RC	52519.338680	1.3430	47.705	127.273
SUPA00118840.fits	W-C-RC	52519.342779	1.3210	48.803	128.736
SUPA00118850.fits	W-C-RC	52519.344827	1.3100	49.342	129.493
SUPA00118860.fits	W-C-RC	52519.346877	1.3000	49.876	130.267
SUPA00118870.fits	W-C-RC	52519.348924	1.2900	50.404	131.061
SUPA00118880.fits	W-C-RC	52519.350973	1.2810	50.925	131.875
SUPA00118890.fits	W-C-RC	52519.353022	1.2720	51.440	132.707
SUPA00118900.fits	W-C-RC	52519.355071	1.2630	51.948	133.560
SUPA00118910.fits	W-C-RC	52519.357119	1.2550	52.448	134.435
SUPA00118940.fits	W-C-RC	52519.363265	1.2320	53.903	137.184
SUPA00118950.fits	W-C-RC	52519.365313	1.2250	54.372	138.148
SUPA00118980.fits	W-C-RC	52519.371471	1.2050	55.725	141.183
SUPA00118990.fits	W-C-RC	52519.373545	1.1990	56.157	142.242
SUPA00119000.fits	W-C-RC	52519.375592	1.1940	56.582	143.338
SUPA00119010.fits	W-C-RC	52519.377640	1.1880	56.992	144.447
SUPA00119040.fits	W-C-RC	52519.383809	1.1740	58.158	147.943
SUPA00119050.fits	W-C-RC	52519.385859	1.1690	58.520	149.158
SUPA00119060.fits	W-C-RC	52519.387906	1.1650	58.871	150.396
SUPA00119100.fits	W-C-RC	52519.396100	1.1510	60.135	155.610
SUPA00119120.fits	W-C-RC	52519.400198	1.1450	60.679	158.369
SUPA00119130.fits	W-C-RC	52519.402246	1.1420	60.928	159.782
SUPA00119150.fits	W-C-RC	52519.406345	1.1370	61.376	162.674
SUPA00119160.fits	W-C-RC	52519.408404	1.1350	61.575	164.162
SUPA00119170.fits	W-C-RC	52519.410452	1.1340	61.756	165.657
SUPA00119180.fits	W-J-B	52519.415906	1.1300	62.151	169.722
SUPA00119190.fits	W-J-B	52519.417952	1.1290	62.266	171.273
SUPA00119230.fits	W-C-RC	52519.429457	1.1270	62.559	180.147
SUPA00119240.fits	W-C-RC	52519.431506	1.1270	62.548	181.736
SUPA00119250.fits	W-C-RC	52519.433554	1.1270	62.517	183.324
SUPA00119260.fits	W-C-RC	52519.435603	1.1280	62.467	184.909
SUPA00119270.fits	W-C-RC	52519.437651	1.1290	62.398	186.484
SUPA00119280.fits	W-C-RC	52519.439700	1.1300	62.310	188.052
SUPA00119290.fits	W-C-RC	52519.441749	1.1310	62.203	189.611
SUPA00119300.fits	W-C-RC	52519.443797	1.1320	62.078	191.153
SUPA00119310.fits	W-C-RC	52519.445847	1.1340	61.934	192.689
SUPA00119320.fits	W-C-RC	52519.447894	1.1360	61.772	194.205
SUPA00119340.fits	W-C-RC	52519.451992	1.1400	61.396	197.180
SUPA00119350.fits	W-C-RC	52519.454040	1.1430	61.182	198.642
SUPA00119360.fits	W-C-RC	52519.456089	1.1450	60.951	200.079

La suite, page suivante ...

ANNEXE D. DONNÉES SMBAS

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00119370.fits	W-C-RC	52519.458137	1.1480	60.705	201.496
SUPA00119380.fits	W-C-RC	52519.460210	1.1510	60.441	202.889
SUPA00119390.fits	W-C-RC	52519.462279	1.1550	60.158	204.287
SUPA00119410.fits	W-C-RC	52519.466390	1.1620	59.554	206.958
SUPA00119420.fits	W-C-RC	52519.468439	1.1660	59.232	208.251
SUPA00119430.fits	W-C-RC	52519.470488	1.1700	58.896	209.518
SUPA00119440.fits	W-C-RC	52519.472536	1.1750	58.546	210.759
SUPA00119460.fits	W-C-RC	52519.476633	1.1850	57.809	213.162
SUPA00119470.fits	W-C-RC	52519.478682	1.1900	57.423	214.325
SUPA00119480.fits	W-C-RC	52519.480730	1.1950	57.025	215.464
SUPA00119490.fits	W-C-RC	52519.482779	1.2010	56.616	216.574
SUPA00119500.fits	W-C-RC	52519.484827	1.2070	56.196	217.659
SUPA00119510.fits	W-C-RC	52519.486876	1.2130	55.766	218.721
SUPA00119540.fits	W-C-RC	52519.493061	1.2340	54.408	221.775
SUPA00119550.fits	W-C-RC	52519.495136	1.2420	53.934	222.752
SUPA00119560.fits	W-C-RC	52519.497217	1.2490	53.450	223.707
SUPA00119570.fits	W-C-RC	52519.499296	1.2580	52.959	224.638
SUPA00119580.fits	W-C-RC	52519.501380	1.2660	52.457	225.549
SUPA00119590.fits	W-C-RC	52519.503453	1.2750	51.951	226.434
SUPA00119600.fits	W-C-RC	52519.505525	1.2840	51.439	227.296
SUPA00119610.fits	W-C-RC	52519.507603	1.2940	50.915	228.142
SUPA00119620.fits	W-C-RC	52519.509684	1.3040	50.385	228.967
SUPA00119630.fits	W-C-RC	52519.511760	1.3140	49.851	229.770
SUPA00119640.fits	W-C-RC	52519.513842	1.3250	49.308	230.557
SUPA00119650.fits	W-C-RC	52519.515934	1.3370	48.756	231.329
SUPA00119660.fits	W-C-RC	52519.518021	1.3480	48.200	232.080
SUPA00119670.fits	W-C-RC	52519.520101	1.3600	47.640	232.813
SUPA00119680.fits	W-C-RC	52519.522163	1.3730	47.080	233.521
SUPA00119690.fits	W-C-RC	52519.524247	1.3860	46.508	234.220
SUPA00119700.fits	W-C-RC	52519.526333	1.4000	45.931	234.904
SUPA00119710.fits	W-C-RC	52519.528416	1.4140	45.350	235.572
SUPA00119720.fits	W-C-RC	52519.530499	1.4290	44.764	236.224
SUPA00119730.fits	W-C-RC	52519.532578	1.4440	44.175	236.861
SUPA00119740.fits	W-C-RC	52519.534665	1.4600	43.580	237.486
SUPA00119750.fits	W-C-RC	52519.536741	1.4760	42.983	238.093
SUPA00119760.fits	W-C-RC	52519.538811	1.4930	42.385	238.687
SUPA00119780.fits	W-C-RC	52519.542930	1.5290	41.182	239.830
SUPA00119790.fits	W-C-RC	52519.544978	1.5480	40.579	240.381
SUPA00119800.fits	W-C-RC	52519.547026	1.5680	39.973	240.920
SUPA00119810.fits	W-C-RC	52519.549075	1.5890	39.363	241.449
SUPA00119820.fits	W-C-RC	52519.551149	1.6100	38.744	241.975

La suite, page suivante ...

ANNEXE D. DONNÉES SMBAS

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00119830.fits	W-C-RC	52519.553196	1.6320	38.127	242.482
SUPA00119840.fits	W-C-RC	52519.555244	1.6560	37.510	242.980
SUPA00119850.fits	W-C-RC	52519.557293	1.6800	36.888	243.469
SUPA00119870.fits	W-C-RC	52519.561390	1.7310	35.639	244.419
SUPA00119880.fits	W-C-RC	52519.563438	1.7580	35.010	244.881
SUPA00119890.fits	W-C-RC	52519.565492	1.7870	34.378	245.336
SUPA00119900.fits	W-C-RC	52519.567539	1.8170	33.745	245.780
SUPA00119910.fits	W-C-RC	52519.569585	1.8480	33.110	246.218
SUPA00119920.fits	W-C-RC	52519.571634	1.8810	32.473	246.648
SUPA00119930.fits	W-C-RC	52519.573681	1.9150	31.833	247.070
SUPA00119940.fits	W-C-RC	52519.575741	1.9510	31.189	247.487
SUPA00119950.fits	W-C-RC	52519.577791	1.9880	30.543	247.897
SUPA00119960.fits	W-C-RC	52519.579843	2.0270	29.898	248.299
SUPA00119970.fits	W-C-RC	52519.581904	2.0690	29.246	248.698
SUPA00119980.fits	W-J-B	52519.588455	2.2160	27.164	249.922
SUPA00119990.fits	W-J-B	52519.590502	2.2670	26.511	250.292
SUPA00120000.fits	W-J-B	52519.594000	2.3610	25.391	250.912
SUPA00120010.fits	W-C-RC	52519.600907	2.5760	23.167	252.094
SUPA00120020.fits	W-C-RC	52519.602978	2.6490	22.497	252.437
SUPA00120030.fits	W-C-RC	52519.605050	2.7270	21.826	252.777
SUPA00120040.fits	W-C-RC	52519.607127	2.8110	21.150	253.113
SUPA00120050.fits	W-C-RC	52519.609173	2.8990	20.486	253.439
SUPA00120060.fits	W-C-RC	52519.611220	2.9940	19.819	253.761
SUPA00120070.fits	W-C-RC	52519.613267	3.0950	19.151	254.081
SUPA00120080.fits	W-C-RC	52519.615313	3.2040	18.483	254.396
SUPA00120090.fits	W-C-RC	52519.617363	3.3220	17.811	254.707
SUPA00120100.fits	W-C-RC	52519.619411	3.4490	17.139	255.015

Fin de la liste pour C0

TAB. D.2: Liste des images pour le Chip 1 ;
centré en $\alpha = 22 : 41 : 38.17799988$, $\delta = -07 : 37 : 45.2322$

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00118531.fits	W-J-B	52519.266795	2.2280	26.114	109.486
SUPA00118541.fits	W-J-B	52519.268843	2.1790	26.769	109.854
SUPA00118551.fits	W-C-RC	52519.276127	2.0240	29.086	111.206
SUPA00118561.fits	W-C-RC	52519.278175	1.9840	29.731	111.598
SUPA00118571.fits	W-C-RC	52519.280221	1.9470	30.378	111.999
SUPA00118581.fits	W-C-RC	52519.282270	1.9110	31.023	112.406
SUPA00118591.fits	W-C-RC	52519.285021	1.8660	31.884	112.964
SUPA00118601.fits	W-C-RC	52519.287073	1.8340	32.524	113.388
SUPA00118611.fits	W-C-RC	52519.289125	1.8040	33.164	113.819
SUPA00118621.fits	W-C-RC	52519.291172	1.7740	33.799	114.257
SUPA00118631.fits	W-C-RC	52519.293218	1.7460	34.430	114.703
SUPA00118641.fits	W-C-RC	52519.295304	1.7190	35.073	115.165
SUPA00118651.fits	W-C-RC	52519.297387	1.6930	35.712	115.636
SUPA00118661.fits	W-C-RC	52519.299434	1.6680	36.338	116.107
SUPA00118671.fits	W-C-RC	52519.301483	1.6450	36.961	116.588
SUPA00118681.fits	W-C-RC	52519.303531	1.6220	37.581	117.077
SUPA00118691.fits	W-C-RC	52519.305580	1.6000	38.199	117.576
SUPA00118701.fits	W-C-RC	52519.307629	1.5790	38.815	118.086
SUPA00118711.fits	W-C-RC	52519.309677	1.5590	39.427	118.606
SUPA00118721.fits	W-C-RC	52519.311726	1.5390	40.036	119.136
SUPA00118731.fits	W-C-RC	52519.313774	1.5210	40.642	119.677
SUPA00118741.fits	W-C-RC	52519.315823	1.5030	41.245	120.229
SUPA00118751.fits	W-C-RC	52519.317871	1.4860	41.844	120.792
SUPA00118761.fits	W-C-RC	52519.319920	1.4690	42.441	121.369
SUPA00118771.fits	W-C-RC	52519.321969	1.4530	43.032	121.957
SUPA00118781.fits	W-C-RC	52519.324017	1.4380	43.621	122.558
SUPA00118801.fits	W-J-B	52519.330708	1.3910	45.514	124.616
SUPA00118811.fits	W-J-B	52519.332755	1.3780	46.084	125.276
SUPA00118821.fits	W-C-RC	52519.338680	1.3430	47.705	127.273
SUPA00118831.fits	W-C-RC	52519.340730	1.3320	48.257	127.996
SUPA00118841.fits	W-C-RC	52519.342779	1.3210	48.803	128.736
SUPA00118851.fits	W-C-RC	52519.344827	1.3100	49.342	129.493
SUPA00118861.fits	W-C-RC	52519.346877	1.3000	49.876	130.267
SUPA00118871.fits	W-C-RC	52519.348924	1.2900	50.404	131.061
SUPA00118881.fits	W-C-RC	52519.350973	1.2810	50.925	131.875
SUPA00118891.fits	W-C-RC	52519.353022	1.2720	51.440	132.707
SUPA00118901.fits	W-C-RC	52519.355071	1.2630	51.948	133.560
SUPA00118911.fits	W-C-RC	52519.357119	1.2550	52.448	134.435

La suite, page suivante ...

ANNEXE D. DONNÉES SMBAS

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00118921.fits	W-C-RC	52519.359167	1.2470	52.940	135.329
SUPA00118931.fits	W-C-RC	52519.361217	1.2390	53.425	136.247
SUPA00118941.fits	W-C-RC	52519.363265	1.2320	53.903	137.184
SUPA00118951.fits	W-C-RC	52519.365313	1.2250	54.372	138.148
SUPA00118961.fits	W-C-RC	52519.367363	1.2180	54.831	139.133
SUPA00118971.fits	W-C-RC	52519.369420	1.2120	55.284	140.147
SUPA00118981.fits	W-C-RC	52519.371471	1.2050	55.725	141.183
SUPA00118991.fits	W-C-RC	52519.373545	1.1990	56.157	142.242
SUPA00119001.fits	W-C-RC	52519.375592	1.1940	56.582	143.338
SUPA00119011.fits	W-C-RC	52519.377640	1.1880	56.992	144.447
SUPA00119021.fits	W-C-RC	52519.379712	1.1830	57.395	145.595
SUPA00119031.fits	W-C-RC	52519.381760	1.1780	57.782	146.755
SUPA00119041.fits	W-C-RC	52519.383809	1.1740	58.158	147.943
SUPA00119051.fits	W-C-RC	52519.385859	1.1690	58.520	149.158
SUPA00119061.fits	W-C-RC	52519.387906	1.1650	58.871	150.396
SUPA00119071.fits	W-C-RC	52519.389954	1.1610	59.208	151.660
SUPA00119081.fits	W-C-RC	52519.392003	1.1570	59.531	152.953
SUPA00119091.fits	W-C-RC	52519.394052	1.1540	59.840	154.270
SUPA00119101.fits	W-C-RC	52519.396100	1.1510	60.135	155.610
SUPA00119111.fits	W-C-RC	52519.398149	1.1480	60.415	156.977
SUPA00119121.fits	W-C-RC	52519.400198	1.1450	60.679	158.369
SUPA00119131.fits	W-C-RC	52519.402246	1.1420	60.928	159.782
SUPA00119141.fits	W-C-RC	52519.404295	1.1400	61.160	161.218
SUPA00119161.fits	W-C-RC	52519.408404	1.1350	61.575	164.162
SUPA00119171.fits	W-C-RC	52519.410452	1.1340	61.756	165.657
SUPA00119181.fits	W-J-B	52519.415906	1.1300	62.151	169.722
SUPA00119191.fits	W-J-B	52519.417952	1.1290	62.266	171.273
SUPA00119201.fits	W-C-RC	52519.423293	1.1270	62.477	175.370
SUPA00119211.fits	W-C-RC	52519.425363	1.1270	62.524	176.969
SUPA00119221.fits	W-C-RC	52519.427410	1.1270	62.551	178.558
SUPA00119231.fits	W-C-RC	52519.429457	1.1270	62.559	180.147
SUPA00119241.fits	W-C-RC	52519.431506	1.1270	62.548	181.736
SUPA00119251.fits	W-C-RC	52519.433554	1.1270	62.517	183.324
SUPA00119261.fits	W-C-RC	52519.435603	1.1280	62.467	184.909
SUPA00119271.fits	W-C-RC	52519.437651	1.1290	62.398	186.484
SUPA00119281.fits	W-C-RC	52519.439700	1.1300	62.310	188.052
SUPA00119291.fits	W-C-RC	52519.441749	1.1310	62.203	189.611
SUPA00119301.fits	W-C-RC	52519.443797	1.1320	62.078	191.153
SUPA00119311.fits	W-C-RC	52519.445847	1.1340	61.934	192.689
SUPA00119321.fits	W-C-RC	52519.447894	1.1360	61.772	194.205
SUPA00119331.fits	W-C-RC	52519.449943	1.1380	61.593	195.703

La suite, page suivante ...

ANNEXE D. DONNÉES SMBAS

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00119341.fits	W-C-RC	52519.451992	1.1400	61.396	197.180
SUPA00119351.fits	W-C-RC	52519.454040	1.1430	61.182	198.642
SUPA00119361.fits	W-C-RC	52519.456089	1.1450	60.951	200.079
SUPA00119371.fits	W-C-RC	52519.458137	1.1480	60.705	201.496
SUPA00119381.fits	W-C-RC	52519.460210	1.1510	60.441	202.889
SUPA00119391.fits	W-C-RC	52519.462279	1.1550	60.158	204.287
SUPA00119401.fits	W-C-RC	52519.464340	1.1580	59.862	205.638
SUPA00119411.fits	W-C-RC	52519.466390	1.1620	59.554	206.958
SUPA00119421.fits	W-C-RC	52519.468439	1.1660	59.232	208.251
SUPA00119431.fits	W-C-RC	52519.470488	1.1700	58.896	209.518
SUPA00119441.fits	W-C-RC	52519.472536	1.1750	58.546	210.759
SUPA00119451.fits	W-C-RC	52519.474585	1.1800	58.183	211.974
SUPA00119461.fits	W-C-RC	52519.476633	1.1850	57.809	213.162
SUPA00119471.fits	W-C-RC	52519.478682	1.1900	57.423	214.325
SUPA00119481.fits	W-C-RC	52519.480730	1.1950	57.025	215.464
SUPA00119491.fits	W-C-RC	52519.482779	1.2010	56.616	216.574
SUPA00119501.fits	W-C-RC	52519.484827	1.2070	56.196	217.659
SUPA00119511.fits	W-C-RC	52519.486876	1.2130	55.766	218.721
SUPA00119521.fits	W-C-RC	52519.488937	1.2200	55.323	219.763
SUPA00119531.fits	W-C-RC	52519.490985	1.2270	54.874	220.776
SUPA00119541.fits	W-C-RC	52519.493061	1.2340	54.408	221.775
SUPA00119551.fits	W-C-RC	52519.495136	1.2420	53.934	222.752
SUPA00119561.fits	W-C-RC	52519.497217	1.2490	53.450	223.707
SUPA00119571.fits	W-C-RC	52519.499296	1.2580	52.959	224.638
SUPA00119581.fits	W-C-RC	52519.501380	1.2660	52.457	225.549
SUPA00119591.fits	W-C-RC	52519.503453	1.2750	51.951	226.434
SUPA00119601.fits	W-C-RC	52519.505525	1.2840	51.439	227.296
SUPA00119611.fits	W-C-RC	52519.507603	1.2940	50.915	228.142
SUPA00119621.fits	W-C-RC	52519.509684	1.3040	50.385	228.967
SUPA00119631.fits	W-C-RC	52519.511760	1.3140	49.851	229.770
SUPA00119641.fits	W-C-RC	52519.513842	1.3250	49.308	230.557
SUPA00119651.fits	W-C-RC	52519.515934	1.3370	48.756	231.329
SUPA00119661.fits	W-C-RC	52519.518021	1.3480	48.200	232.080
SUPA00119671.fits	W-C-RC	52519.520101	1.3600	47.640	232.813
SUPA00119681.fits	W-C-RC	52519.522163	1.3730	47.080	233.521
SUPA00119691.fits	W-C-RC	52519.524247	1.3860	46.508	234.220
SUPA00119701.fits	W-C-RC	52519.526333	1.4000	45.931	234.904
SUPA00119711.fits	W-C-RC	52519.528416	1.4140	45.350	235.572
SUPA00119721.fits	W-C-RC	52519.530499	1.4290	44.764	236.224
SUPA00119731.fits	W-C-RC	52519.532578	1.4440	44.175	236.861
SUPA00119741.fits	W-C-RC	52519.534665	1.4600	43.580	237.486

La suite, page suivante ...

ANNEXE D. DONNÉES SMBAS

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00119751.fits	W-C-RC	52519.536741	1.4760	42.983	238.093
SUPA00119761.fits	W-C-RC	52519.538811	1.4930	42.385	238.687
SUPA00119771.fits	W-C-RC	52519.540880	1.5110	41.782	239.268
SUPA00119781.fits	W-C-RC	52519.542930	1.5290	41.182	239.830
SUPA00119791.fits	W-C-RC	52519.544978	1.5480	40.579	240.381
SUPA00119801.fits	W-C-RC	52519.547026	1.5680	39.973	240.920
SUPA00119811.fits	W-C-RC	52519.549075	1.5890	39.363	241.449
SUPA00119821.fits	W-C-RC	52519.551149	1.6100	38.744	241.975
SUPA00119831.fits	W-C-RC	52519.553196	1.6320	38.127	242.482
SUPA00119841.fits	W-C-RC	52519.555244	1.6560	37.510	242.980
SUPA00119851.fits	W-C-RC	52519.557293	1.6800	36.888	243.469
SUPA00119861.fits	W-C-RC	52519.559342	1.7050	36.265	243.949
SUPA00119871.fits	W-C-RC	52519.561390	1.7310	35.639	244.419
SUPA00119881.fits	W-C-RC	52519.563438	1.7580	35.010	244.881
SUPA00119891.fits	W-C-RC	52519.565492	1.7870	34.378	245.336
SUPA00119901.fits	W-C-RC	52519.567539	1.8170	33.745	245.780
SUPA00119911.fits	W-C-RC	52519.569585	1.8480	33.110	246.218
SUPA00119921.fits	W-C-RC	52519.571634	1.8810	32.473	246.648
SUPA00119931.fits	W-C-RC	52519.573681	1.9150	31.833	247.070
SUPA00119941.fits	W-C-RC	52519.575741	1.9510	31.189	247.487
SUPA00119951.fits	W-C-RC	52519.577791	1.9880	30.543	247.897
SUPA00119961.fits	W-C-RC	52519.579843	2.0270	29.898	248.299
SUPA00119971.fits	W-C-RC	52519.581904	2.0690	29.246	248.698
SUPA00119981.fits	W-J-B	52519.588455	2.2160	27.164	249.922
SUPA00119991.fits	W-J-B	52519.590502	2.2670	26.511	250.292
SUPA00120001.fits	W-J-B	52519.594000	2.3610	25.391	250.912
SUPA00120011.fits	W-C-RC	52519.600907	2.5760	23.167	252.094
SUPA00120021.fits	W-C-RC	52519.602978	2.6490	22.497	252.437
SUPA00120031.fits	W-C-RC	52519.605050	2.7270	21.826	252.777
SUPA00120041.fits	W-C-RC	52519.607127	2.8110	21.150	253.113
SUPA00120051.fits	W-C-RC	52519.609173	2.8990	20.486	253.439
SUPA00120061.fits	W-C-RC	52519.611220	2.9940	19.819	253.761
SUPA00120071.fits	W-C-RC	52519.613267	3.0950	19.151	254.081
SUPA00120081.fits	W-C-RC	52519.615313	3.2040	18.483	254.396
SUPA00120091.fits	W-C-RC	52519.617363	3.3220	17.811	254.707

Fin de la liste pour C1

TAB. D.3: Liste des images pour le Chip 2.
centré en $\alpha = 22 : 41 : 38.4480$, $\delta = -07 : 44 : 20.4018$

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00118532.fits	W-J-B	52519.266795	2.2280	26.114	109.486
SUPA00118542.fits	W-J-B	52519.268843	2.1790	26.769	109.854
SUPA00118552.fits	W-C-RC	52519.276127	2.0240	29.086	111.206
SUPA00118562.fits	W-C-RC	52519.278175	1.9840	29.731	111.598
SUPA00118572.fits	W-C-RC	52519.280221	1.9470	30.378	111.999
SUPA00118582.fits	W-C-RC	52519.282270	1.9110	31.023	112.406
SUPA00118592.fits	W-C-RC	52519.285021	1.8660	31.884	112.964
SUPA00118602.fits	W-C-RC	52519.287073	1.8340	32.524	113.388
SUPA00118612.fits	W-C-RC	52519.289125	1.8040	33.164	113.819
SUPA00118622.fits	W-C-RC	52519.291172	1.7740	33.799	114.257
SUPA00118632.fits	W-C-RC	52519.293218	1.7460	34.430	114.703
SUPA00118642.fits	W-C-RC	52519.295304	1.7190	35.073	115.165
SUPA00118652.fits	W-C-RC	52519.297387	1.6930	35.712	115.636
SUPA00118662.fits	W-C-RC	52519.299434	1.6680	36.338	116.107
SUPA00118672.fits	W-C-RC	52519.301483	1.6450	36.961	116.588
SUPA00118682.fits	W-C-RC	52519.303531	1.6220	37.581	117.077
SUPA00118692.fits	W-C-RC	52519.305580	1.6000	38.199	117.576
SUPA00118702.fits	W-C-RC	52519.307629	1.5790	38.815	118.086
SUPA00118722.fits	W-C-RC	52519.311726	1.5390	40.036	119.136
SUPA00118732.fits	W-C-RC	52519.313774	1.5210	40.642	119.677
SUPA00118742.fits	W-C-RC	52519.315823	1.5030	41.245	120.229
SUPA00118752.fits	W-C-RC	52519.317871	1.4860	41.844	120.792
SUPA00118762.fits	W-C-RC	52519.319920	1.4690	42.441	121.369
SUPA00118772.fits	W-C-RC	52519.321969	1.4530	43.032	121.957
SUPA00118782.fits	W-C-RC	52519.324017	1.4380	43.621	122.558
SUPA00118802.fits	W-J-B	52519.330708	1.3910	45.514	124.616
SUPA00118812.fits	W-J-B	52519.332755	1.3780	46.084	125.276
SUPA00118822.fits	W-C-RC	52519.338680	1.3430	47.705	127.273
SUPA00118832.fits	W-C-RC	52519.340730	1.3320	48.257	127.996
SUPA00118842.fits	W-C-RC	52519.342779	1.3210	48.803	128.736
SUPA00118852.fits	W-C-RC	52519.344827	1.3100	49.342	129.493
SUPA00118862.fits	W-C-RC	52519.346877	1.3000	49.876	130.267
SUPA00118872.fits	W-C-RC	52519.348924	1.2900	50.404	131.061
SUPA00118882.fits	W-C-RC	52519.350973	1.2810	50.925	131.875
SUPA00118892.fits	W-C-RC	52519.353022	1.2720	51.440	132.707
SUPA00118902.fits	W-C-RC	52519.355071	1.2630	51.948	133.560
SUPA00118912.fits	W-C-RC	52519.357119	1.2550	52.448	134.435
SUPA00118922.fits	W-C-RC	52519.359167	1.2470	52.940	135.329

La suite, page suivante ...

ANNEXE D. DONNÉES SMBAS

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00118932.fits	W-C-RC	52519.361217	1.2390	53.425	136.247
SUPA00118942.fits	W-C-RC	52519.363265	1.2320	53.903	137.184
SUPA00118952.fits	W-C-RC	52519.365313	1.2250	54.372	138.148
SUPA00118962.fits	W-C-RC	52519.367363	1.2180	54.831	139.133
SUPA00118972.fits	W-C-RC	52519.369420	1.2120	55.284	140.147
SUPA00118982.fits	W-C-RC	52519.371471	1.2050	55.725	141.183
SUPA00118992.fits	W-C-RC	52519.373545	1.1990	56.157	142.242
SUPA00119002.fits	W-C-RC	52519.375592	1.1940	56.582	143.338
SUPA00119012.fits	W-C-RC	52519.377640	1.1880	56.992	144.447
SUPA00119022.fits	W-C-RC	52519.379712	1.1830	57.395	145.595
SUPA00119032.fits	W-C-RC	52519.381760	1.1780	57.782	146.755
SUPA00119042.fits	W-C-RC	52519.383809	1.1740	58.158	147.943
SUPA00119052.fits	W-C-RC	52519.385859	1.1690	58.520	149.158
SUPA00119062.fits	W-C-RC	52519.387906	1.1650	58.871	150.396
SUPA00119072.fits	W-C-RC	52519.389954	1.1610	59.208	151.660
SUPA00119082.fits	W-C-RC	52519.392003	1.1570	59.531	152.953
SUPA00119092.fits	W-C-RC	52519.394052	1.1540	59.840	154.270
SUPA00119102.fits	W-C-RC	52519.396100	1.1510	60.135	155.610
SUPA00119112.fits	W-C-RC	52519.398149	1.1480	60.415	156.977
SUPA00119122.fits	W-C-RC	52519.400198	1.1450	60.679	158.369
SUPA00119132.fits	W-C-RC	52519.402246	1.1420	60.928	159.782
SUPA00119142.fits	W-C-RC	52519.404295	1.1400	61.160	161.218
SUPA00119152.fits	W-C-RC	52519.406345	1.1370	61.376	162.674
SUPA00119162.fits	W-C-RC	52519.408404	1.1350	61.575	164.162
SUPA00119172.fits	W-C-RC	52519.410452	1.1340	61.756	165.657
SUPA00119182.fits	W-J-B	52519.415906	1.1300	62.151	169.722
SUPA00119192.fits	W-J-B	52519.417952	1.1290	62.266	171.273
SUPA00119202.fits	W-C-RC	52519.423293	1.1270	62.477	175.370
SUPA00119212.fits	W-C-RC	52519.425363	1.1270	62.524	176.969
SUPA00119222.fits	W-C-RC	52519.427410	1.1270	62.551	178.558
SUPA00119232.fits	W-C-RC	52519.429457	1.1270	62.559	180.147
SUPA00119242.fits	W-C-RC	52519.431506	1.1270	62.548	181.736
SUPA00119252.fits	W-C-RC	52519.433554	1.1270	62.517	183.324
SUPA00119262.fits	W-C-RC	52519.435603	1.1280	62.467	184.909
SUPA00119272.fits	W-C-RC	52519.437651	1.1290	62.398	186.484
SUPA00119282.fits	W-C-RC	52519.439700	1.1300	62.310	188.052
SUPA00119292.fits	W-C-RC	52519.441749	1.1310	62.203	189.611
SUPA00119302.fits	W-C-RC	52519.443797	1.1320	62.078	191.153
SUPA00119312.fits	W-C-RC	52519.445847	1.1340	61.934	192.689
SUPA00119322.fits	W-C-RC	52519.447894	1.1360	61.772	194.205
SUPA00119342.fits	W-C-RC	52519.451992	1.1400	61.396	197.180

La suite, page suivante ...

ANNEXE D. DONNÉES SMBAS

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00119352.fits	W-C-RC	52519.454040	1.1430	61.182	198.642
SUPA00119362.fits	W-C-RC	52519.456089	1.1450	60.951	200.079
SUPA00119372.fits	W-C-RC	52519.458137	1.1480	60.705	201.496
SUPA00119382.fits	W-C-RC	52519.460210	1.1510	60.441	202.889
SUPA00119392.fits	W-C-RC	52519.462279	1.1550	60.158	204.287
SUPA00119402.fits	W-C-RC	52519.464340	1.1580	59.862	205.638
SUPA00119412.fits	W-C-RC	52519.466390	1.1620	59.554	206.958
SUPA00119422.fits	W-C-RC	52519.468439	1.1660	59.232	208.251
SUPA00119432.fits	W-C-RC	52519.470488	1.1700	58.896	209.518
SUPA00119442.fits	W-C-RC	52519.472536	1.1750	58.546	210.759
SUPA00119452.fits	W-C-RC	52519.474585	1.1800	58.183	211.974
SUPA00119462.fits	W-C-RC	52519.476633	1.1850	57.809	213.162
SUPA00119482.fits	W-C-RC	52519.480730	1.1950	57.025	215.464
SUPA00119492.fits	W-C-RC	52519.482779	1.2010	56.616	216.574
SUPA00119502.fits	W-C-RC	52519.484827	1.2070	56.196	217.659
SUPA00119512.fits	W-C-RC	52519.486876	1.2130	55.766	218.721
SUPA00119522.fits	W-C-RC	52519.488937	1.2200	55.323	219.763
SUPA00119532.fits	W-C-RC	52519.490985	1.2270	54.874	220.776
SUPA00119542.fits	W-C-RC	52519.493061	1.2340	54.408	221.775
SUPA00119552.fits	W-C-RC	52519.495136	1.2420	53.934	222.752
SUPA00119562.fits	W-C-RC	52519.497217	1.2490	53.450	223.707
SUPA00119572.fits	W-C-RC	52519.499296	1.2580	52.959	224.638
SUPA00119582.fits	W-C-RC	52519.501380	1.2660	52.457	225.549
SUPA00119592.fits	W-C-RC	52519.503453	1.2750	51.951	226.434
SUPA00119602.fits	W-C-RC	52519.505525	1.2840	51.439	227.296
SUPA00119612.fits	W-C-RC	52519.507603	1.2940	50.915	228.142
SUPA00119622.fits	W-C-RC	52519.509684	1.3040	50.385	228.967
SUPA00119632.fits	W-C-RC	52519.511760	1.3140	49.851	229.770
SUPA00119642.fits	W-C-RC	52519.513842	1.3250	49.308	230.557
SUPA00119652.fits	W-C-RC	52519.515934	1.3370	48.756	231.329
SUPA00119662.fits	W-C-RC	52519.518021	1.3480	48.200	232.080
SUPA00119682.fits	W-C-RC	52519.522163	1.3730	47.080	233.521
SUPA00119692.fits	W-C-RC	52519.524247	1.3860	46.508	234.220
SUPA00119702.fits	W-C-RC	52519.526333	1.4000	45.931	234.904
SUPA00119712.fits	W-C-RC	52519.528416	1.4140	45.350	235.572
SUPA00119722.fits	W-C-RC	52519.530499	1.4290	44.764	236.224
SUPA00119732.fits	W-C-RC	52519.532578	1.4440	44.175	236.861
SUPA00119742.fits	W-C-RC	52519.534665	1.4600	43.580	237.486
SUPA00119752.fits	W-C-RC	52519.536741	1.4760	42.983	238.093
SUPA00119762.fits	W-C-RC	52519.538811	1.4930	42.385	238.687
SUPA00119772.fits	W-C-RC	52519.540880	1.5110	41.782	239.268

La suite, page suivante ...

ANNEXE D. DONNÉES SMBAS

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00119782.fits	W-C-RC	52519.542930	1.5290	41.182	239.830
SUPA00119792.fits	W-C-RC	52519.544978	1.5480	40.579	240.381
SUPA00119802.fits	W-C-RC	52519.547026	1.5680	39.973	240.920
SUPA00119812.fits	W-C-RC	52519.549075	1.5890	39.363	241.449
SUPA00119822.fits	W-C-RC	52519.551149	1.6100	38.744	241.975
SUPA00119842.fits	W-C-RC	52519.555244	1.6560	37.510	242.980
SUPA00119852.fits	W-C-RC	52519.557293	1.6800	36.888	243.469
SUPA00119862.fits	W-C-RC	52519.559342	1.7050	36.265	243.949
SUPA00119872.fits	W-C-RC	52519.561390	1.7310	35.639	244.419
SUPA00119882.fits	W-C-RC	52519.563438	1.7580	35.010	244.881
SUPA00119892.fits	W-C-RC	52519.565492	1.7870	34.378	245.336
SUPA00119902.fits	W-C-RC	52519.567539	1.8170	33.745	245.780
SUPA00119912.fits	W-C-RC	52519.569585	1.8480	33.110	246.218
SUPA00119922.fits	W-C-RC	52519.571634	1.8810	32.473	246.648
SUPA00119932.fits	W-C-RC	52519.573681	1.9150	31.833	247.070
SUPA00119942.fits	W-C-RC	52519.575741	1.9510	31.189	247.487
SUPA00119952.fits	W-C-RC	52519.577791	1.9880	30.543	247.897
SUPA00119962.fits	W-C-RC	52519.579843	2.0270	29.898	248.299
SUPA00119972.fits	W-C-RC	52519.581904	2.0690	29.246	248.698
SUPA00119982.fits	W-J-B	52519.588455	2.2160	27.164	249.922
SUPA00119992.fits	W-J-B	52519.590502	2.2670	26.511	250.292
SUPA00120002.fits	W-J-B	52519.594000	2.3610	25.391	250.912
SUPA00120012.fits	W-C-RC	52519.600907	2.5760	23.167	252.094
SUPA00120022.fits	W-C-RC	52519.602978	2.6490	22.497	252.437
SUPA00120032.fits	W-C-RC	52519.605050	2.7270	21.826	252.777
SUPA00120042.fits	W-C-RC	52519.607127	2.8110	21.150	253.113
SUPA00120052.fits	W-C-RC	52519.609173	2.8990	20.486	253.439
SUPA00120062.fits	W-C-RC	52519.611220	2.9940	19.819	253.761
SUPA00120072.fits	W-C-RC	52519.613267	3.0950	19.151	254.081
SUPA00120082.fits	W-C-RC	52519.615313	3.2040	18.483	254.396
SUPA00120092.fits	W-C-RC	52519.617363	3.3220	17.811	254.707
SUPA00120102.fits	W-C-RC	52519.619411	3.4490	17.139	255.015

Fin de la liste pour C2

TAB. D.4: Liste des images pour le Chip 3 ;
centré en $\alpha = 22 : 41 : 09 : 9984$, $\delta = -07 : 44 : 20.5440$

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00118533.fits	W-J-B	52519.266795	2.2280	26.114	109.486
SUPA00118543.fits	W-J-B	52519.268843	2.1790	26.769	109.854
SUPA00118553.fits	W-C-RC	52519.276127	2.0240	29.086	111.206
SUPA00118563.fits	W-C-RC	52519.278175	1.9840	29.731	111.598
SUPA00118573.fits	W-C-RC	52519.280221	1.9470	30.378	111.999
SUPA00118583.fits	W-C-RC	52519.282270	1.9110	31.023	112.406
SUPA00118603.fits	W-C-RC	52519.287073	1.8340	32.524	113.388
SUPA00118613.fits	W-C-RC	52519.289125	1.8040	33.164	113.819
SUPA00118623.fits	W-C-RC	52519.291172	1.7740	33.799	114.257
SUPA00118633.fits	W-C-RC	52519.293218	1.7460	34.430	114.703
SUPA00118643.fits	W-C-RC	52519.295304	1.7190	35.073	115.165
SUPA00118653.fits	W-C-RC	52519.297387	1.6930	35.712	115.636
SUPA00118663.fits	W-C-RC	52519.299434	1.6680	36.338	116.107
SUPA00118673.fits	W-C-RC	52519.301483	1.6450	36.961	116.588
SUPA00118683.fits	W-C-RC	52519.303531	1.6220	37.581	117.077
SUPA00118693.fits	W-C-RC	52519.305580	1.6000	38.199	117.576
SUPA00118703.fits	W-C-RC	52519.307629	1.5790	38.815	118.086
SUPA00118713.fits	W-C-RC	52519.309677	1.5590	39.427	118.606
SUPA00118723.fits	W-C-RC	52519.311726	1.5390	40.036	119.136
SUPA00118733.fits	W-C-RC	52519.313774	1.5210	40.642	119.677
SUPA00118743.fits	W-C-RC	52519.315823	1.5030	41.245	120.229
SUPA00118753.fits	W-C-RC	52519.317871	1.4860	41.844	120.792
SUPA00118763.fits	W-C-RC	52519.319920	1.4690	42.441	121.369
SUPA00118773.fits	W-C-RC	52519.321969	1.4530	43.032	121.957
SUPA00118783.fits	W-C-RC	52519.324017	1.4380	43.621	122.558
SUPA00118803.fits	W-J-B	52519.330708	1.3910	45.514	124.616
SUPA00118813.fits	W-J-B	52519.332755	1.3780	46.084	125.276
SUPA00118823.fits	W-C-RC	52519.338680	1.3430	47.705	127.273
SUPA00118833.fits	W-C-RC	52519.340730	1.3320	48.257	127.996
SUPA00118843.fits	W-C-RC	52519.342779	1.3210	48.803	128.736
SUPA00118853.fits	W-C-RC	52519.344827	1.3100	49.342	129.493
SUPA00118883.fits	W-C-RC	52519.350973	1.2810	50.925	131.875
SUPA00118893.fits	W-C-RC	52519.353022	1.2720	51.440	132.707
SUPA00118903.fits	W-C-RC	52519.355071	1.2630	51.948	133.560
SUPA00118913.fits	W-C-RC	52519.357119	1.2550	52.448	134.435
SUPA00118923.fits	W-C-RC	52519.359167	1.2470	52.940	135.329
SUPA00118933.fits	W-C-RC	52519.361217	1.2390	53.425	136.247
SUPA00118943.fits	W-C-RC	52519.363265	1.2320	53.903	137.184

La suite, page suivante ...

ANNEXE D. DONNÉES SMBAS

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00118963.fits	W-C-RC	52519.367363	1.2180	54.831	139.133
SUPA00118973.fits	W-C-RC	52519.369420	1.2120	55.284	140.147
SUPA00118983.fits	W-C-RC	52519.371471	1.2050	55.725	141.183
SUPA00118993.fits	W-C-RC	52519.373545	1.1990	56.157	142.242
SUPA00119003.fits	W-C-RC	52519.375592	1.1940	56.582	143.338
SUPA00119013.fits	W-C-RC	52519.377640	1.1880	56.992	144.447
SUPA00119023.fits	W-C-RC	52519.379712	1.1830	57.395	145.595
SUPA00119033.fits	W-C-RC	52519.381760	1.1780	57.782	146.755
SUPA00119043.fits	W-C-RC	52519.383809	1.1740	58.158	147.943
SUPA00119053.fits	W-C-RC	52519.385859	1.1690	58.520	149.158
SUPA00119073.fits	W-C-RC	52519.389954	1.1610	59.208	151.660
SUPA00119083.fits	W-C-RC	52519.392003	1.1570	59.531	152.953
SUPA00119093.fits	W-C-RC	52519.394052	1.1540	59.840	154.270
SUPA00119103.fits	W-C-RC	52519.396100	1.1510	60.135	155.610
SUPA00119113.fits	W-C-RC	52519.398149	1.1480	60.415	156.977
SUPA00119123.fits	W-C-RC	52519.400198	1.1450	60.679	158.369
SUPA00119143.fits	W-C-RC	52519.404295	1.1400	61.160	161.218
SUPA00119153.fits	W-C-RC	52519.406345	1.1370	61.376	162.674
SUPA00119163.fits	W-C-RC	52519.408404	1.1350	61.575	164.162
SUPA00119173.fits	W-C-RC	52519.410452	1.1340	61.756	165.657
SUPA00119183.fits	W-J-B	52519.415906	1.1300	62.151	169.722
SUPA00119193.fits	W-J-B	52519.417952	1.1290	62.266	171.273
SUPA00119213.fits	W-C-RC	52519.425363	1.1270	62.524	176.969
SUPA00119223.fits	W-C-RC	52519.427410	1.1270	62.551	178.558
SUPA00119233.fits	W-C-RC	52519.429457	1.1270	62.559	180.147
SUPA00119243.fits	W-C-RC	52519.431506	1.1270	62.548	181.736
SUPA00119253.fits	W-C-RC	52519.433554	1.1270	62.517	183.324
SUPA00119263.fits	W-C-RC	52519.435603	1.1280	62.467	184.909
SUPA00119273.fits	W-C-RC	52519.437651	1.1290	62.398	186.484
SUPA00119283.fits	W-C-RC	52519.439700	1.1300	62.310	188.052
SUPA00119293.fits	W-C-RC	52519.441749	1.1310	62.203	189.611
SUPA00119323.fits	W-C-RC	52519.447894	1.1360	61.772	194.205
SUPA00119333.fits	W-C-RC	52519.449943	1.1380	61.593	195.703
SUPA00119343.fits	W-C-RC	52519.451992	1.1400	61.396	197.180
SUPA00119353.fits	W-C-RC	52519.454040	1.1430	61.182	198.642
SUPA00119363.fits	W-C-RC	52519.456089	1.1450	60.951	200.079
SUPA00119383.fits	W-C-RC	52519.460210	1.1510	60.441	202.889
SUPA00119393.fits	W-C-RC	52519.462279	1.1550	60.158	204.287
SUPA00119403.fits	W-C-RC	52519.464340	1.1580	59.862	205.638
SUPA00119413.fits	W-C-RC	52519.466390	1.1620	59.554	206.958
SUPA00119423.fits	W-C-RC	52519.468439	1.1660	59.232	208.251

La suite, page suivante ...

ANNEXE D. DONNÉES SMBAS

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00119433.fits	W-C-RC	52519.470488	1.1700	58.896	209.518
SUPA00119443.fits	W-C-RC	52519.472536	1.1750	58.546	210.759
SUPA00119453.fits	W-C-RC	52519.474585	1.1800	58.183	211.974
SUPA00119463.fits	W-C-RC	52519.476633	1.1850	57.809	213.162
SUPA00119473.fits	W-C-RC	52519.478682	1.1900	57.423	214.325
SUPA00119483.fits	W-C-RC	52519.480730	1.1950	57.025	215.464
SUPA00119493.fits	W-C-RC	52519.482779	1.2010	56.616	216.574
SUPA00119503.fits	W-C-RC	52519.484827	1.2070	56.196	217.659
SUPA00119513.fits	W-C-RC	52519.486876	1.2130	55.766	218.721
SUPA00119523.fits	W-C-RC	52519.488937	1.2200	55.323	219.763
SUPA00119533.fits	W-C-RC	52519.490985	1.2270	54.874	220.776
SUPA00119543.fits	W-C-RC	52519.493061	1.2340	54.408	221.775
SUPA00119553.fits	W-C-RC	52519.495136	1.2420	53.934	222.752
SUPA00119563.fits	W-C-RC	52519.497217	1.2490	53.450	223.707
SUPA00119573.fits	W-C-RC	52519.499296	1.2580	52.959	224.638
SUPA00119583.fits	W-C-RC	52519.501380	1.2660	52.457	225.549
SUPA00119593.fits	W-C-RC	52519.503453	1.2750	51.951	226.434
SUPA00119603.fits	W-C-RC	52519.505525	1.2840	51.439	227.296
SUPA00119613.fits	W-C-RC	52519.507603	1.2940	50.915	228.142
SUPA00119623.fits	W-C-RC	52519.509684	1.3040	50.385	228.967
SUPA00119633.fits	W-C-RC	52519.511760	1.3140	49.851	229.770
SUPA00119643.fits	W-C-RC	52519.513842	1.3250	49.308	230.557
SUPA00119653.fits	W-C-RC	52519.515934	1.3370	48.756	231.329
SUPA00119663.fits	W-C-RC	52519.518021	1.3480	48.200	232.080
SUPA00119673.fits	W-C-RC	52519.520101	1.3600	47.640	232.813
SUPA00119683.fits	W-C-RC	52519.522163	1.3730	47.080	233.521
SUPA00119693.fits	W-C-RC	52519.524247	1.3860	46.508	234.220
SUPA00119703.fits	W-C-RC	52519.526333	1.4000	45.931	234.904
SUPA00119713.fits	W-C-RC	52519.528416	1.4140	45.350	235.572
SUPA00119723.fits	W-C-RC	52519.530499	1.4290	44.764	236.224
SUPA00119733.fits	W-C-RC	52519.532578	1.4440	44.175	236.861
SUPA00119743.fits	W-C-RC	52519.534665	1.4600	43.580	237.486
SUPA00119753.fits	W-C-RC	52519.536741	1.4760	42.983	238.093
SUPA00119763.fits	W-C-RC	52519.538811	1.4930	42.385	238.687
SUPA00119783.fits	W-C-RC	52519.542930	1.5290	41.182	239.830
SUPA00119803.fits	W-C-RC	52519.547026	1.5680	39.973	240.920
SUPA00119813.fits	W-C-RC	52519.549075	1.5890	39.363	241.449
SUPA00119823.fits	W-C-RC	52519.551149	1.6100	38.744	241.975
SUPA00119833.fits	W-C-RC	52519.553196	1.6320	38.127	242.482
SUPA00119843.fits	W-C-RC	52519.555244	1.6560	37.510	242.980
SUPA00119853.fits	W-C-RC	52519.557293	1.6800	36.888	243.469

La suite, page suivante ...

ANNEXE D. DONNÉES SMBAS

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00119863.fits	W-C-RC	52519.559342	1.7050	36.265	243.949
SUPA00119873.fits	W-C-RC	52519.561390	1.7310	35.639	244.419
SUPA00119883.fits	W-C-RC	52519.563438	1.7580	35.010	244.881
SUPA00119893.fits	W-C-RC	52519.565492	1.7870	34.378	245.336
SUPA00119903.fits	W-C-RC	52519.567539	1.8170	33.745	245.780
SUPA00119913.fits	W-C-RC	52519.569585	1.8480	33.110	246.218
SUPA00119923.fits	W-C-RC	52519.571634	1.8810	32.473	246.648
SUPA00119933.fits	W-C-RC	52519.573681	1.9150	31.833	247.070
SUPA00119943.fits	W-C-RC	52519.575741	1.9510	31.189	247.487
SUPA00119953.fits	W-C-RC	52519.577791	1.9880	30.543	247.897
SUPA00119963.fits	W-C-RC	52519.579843	2.0270	29.898	248.299
SUPA00119973.fits	W-C-RC	52519.581904	2.0690	29.246	248.698
SUPA00119983.fits	W-J-B	52519.588455	2.2160	27.164	249.922
SUPA00119993.fits	W-J-B	52519.590502	2.2670	26.511	250.292
SUPA00120003.fits	W-J-B	52519.594000	2.3610	25.391	250.912
SUPA00120013.fits	W-C-RC	52519.600907	2.5760	23.167	252.094
SUPA00120023.fits	W-C-RC	52519.602978	2.6490	22.497	252.437
SUPA00120033.fits	W-C-RC	52519.605050	2.7270	21.826	252.777
SUPA00120043.fits	W-C-RC	52519.607127	2.8110	21.150	253.113
SUPA00120063.fits	W-C-RC	52519.611220	2.9940	19.819	253.761
SUPA00120073.fits	W-C-RC	52519.613267	3.0950	19.151	254.081
SUPA00120083.fits	W-C-RC	52519.615313	3.2040	18.483	254.396
SUPA00120093.fits	W-C-RC	52519.617363	3.3220	17.811	254.707
SUPA00120103.fits	W-C-RC	52519.619411	3.4490	17.139	255.015

Fin de la liste pour C3

TAB. D.5: Liste des images pour le Chip 4 ; centré en $\alpha = 22 : 41 : 10.1520$, $\delta = -07 : 30 : 42.8616$

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00118604.fits	W-C-RC	52519.287073	1.8340	32.524	113.388
SUPA00118614.fits	W-C-RC	52519.289125	1.8040	33.164	113.819
SUPA00118624.fits	W-C-RC	52519.291172	1.7740	33.799	114.257
SUPA00118634.fits	W-C-RC	52519.293218	1.7460	34.430	114.703
SUPA00118644.fits	W-C-RC	52519.295304	1.7190	35.073	115.165
SUPA00118654.fits	W-C-RC	52519.297387	1.6930	35.712	115.636
SUPA00118664.fits	W-C-RC	52519.299434	1.6680	36.338	116.107
SUPA00118674.fits	W-C-RC	52519.301483	1.6450	36.961	116.588
SUPA00118684.fits	W-C-RC	52519.303531	1.6220	37.581	117.077
SUPA00118694.fits	W-C-RC	52519.305580	1.6000	38.199	117.576
SUPA00118704.fits	W-C-RC	52519.307629	1.5790	38.815	118.086
SUPA00118714.fits	W-C-RC	52519.309677	1.5590	39.427	118.606
SUPA00118724.fits	W-C-RC	52519.311726	1.5390	40.036	119.136
SUPA00118734.fits	W-C-RC	52519.313774	1.5210	40.642	119.677
SUPA00118744.fits	W-C-RC	52519.315823	1.5030	41.245	120.229
SUPA00118754.fits	W-C-RC	52519.317871	1.4860	41.844	120.792
SUPA00118764.fits	W-C-RC	52519.319920	1.4690	42.441	121.369
SUPA00118774.fits	W-C-RC	52519.321969	1.4530	43.032	121.957
SUPA00118784.fits	W-C-RC	52519.324017	1.4380	43.621	122.558
SUPA00118804.fits	W-J-B	52519.330708	1.3910	45.514	124.616
SUPA00118814.fits	W-J-B	52519.332755	1.3780	46.084	125.276
SUPA00118824.fits	W-C-RC	52519.338680	1.3430	47.705	127.273
SUPA00118834.fits	W-C-RC	52519.340730	1.3320	48.257	127.996
SUPA00118844.fits	W-C-RC	52519.342779	1.3210	48.803	128.736
SUPA00118854.fits	W-C-RC	52519.344827	1.3100	49.342	129.493
SUPA00118864.fits	W-C-RC	52519.346877	1.3000	49.876	130.267
SUPA00118884.fits	W-C-RC	52519.350973	1.2810	50.925	131.875
SUPA00118894.fits	W-C-RC	52519.353022	1.2720	51.440	132.707
SUPA00118904.fits	W-C-RC	52519.355071	1.2630	51.948	133.560
SUPA00118914.fits	W-C-RC	52519.357119	1.2550	52.448	134.435
SUPA00118924.fits	W-C-RC	52519.359167	1.2470	52.940	135.329
SUPA00118934.fits	W-C-RC	52519.361217	1.2390	53.425	136.247
SUPA00118944.fits	W-C-RC	52519.363265	1.2320	53.903	137.184
SUPA00118954.fits	W-C-RC	52519.365313	1.2250	54.372	138.148
SUPA00118964.fits	W-C-RC	52519.367363	1.2180	54.831	139.133
SUPA00118974.fits	W-C-RC	52519.369420	1.2120	55.284	140.147
SUPA00118984.fits	W-C-RC	52519.371471	1.2050	55.725	141.183
SUPA00118994.fits	W-C-RC	52519.373545	1.1990	56.157	142.242

La suite, page suivante ...

ANNEXE D. DONNÉES SMBAS

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00119004.fits	W-C-RC	52519.375592	1.1940	56.582	143.338
SUPA00119014.fits	W-C-RC	52519.377640	1.1880	56.992	144.447
SUPA00119024.fits	W-C-RC	52519.379712	1.1830	57.395	145.595
SUPA00119034.fits	W-C-RC	52519.381760	1.1780	57.782	146.755
SUPA00119044.fits	W-C-RC	52519.383809	1.1740	58.158	147.943
SUPA00119054.fits	W-C-RC	52519.385859	1.1690	58.520	149.158
SUPA00119064.fits	W-C-RC	52519.387906	1.1650	58.871	150.396
SUPA00119074.fits	W-C-RC	52519.389954	1.1610	59.208	151.660
SUPA00119084.fits	W-C-RC	52519.392003	1.1570	59.531	152.953
SUPA00119094.fits	W-C-RC	52519.394052	1.1540	59.840	154.270
SUPA00119104.fits	W-C-RC	52519.396100	1.1510	60.135	155.610
SUPA00119114.fits	W-C-RC	52519.398149	1.1480	60.415	156.977
SUPA00119124.fits	W-C-RC	52519.400198	1.1450	60.679	158.369
SUPA00119134.fits	W-C-RC	52519.402246	1.1420	60.928	159.782
SUPA00119144.fits	W-C-RC	52519.404295	1.1400	61.160	161.218
SUPA00119154.fits	W-C-RC	52519.406345	1.1370	61.376	162.674
SUPA00119164.fits	W-C-RC	52519.408404	1.1350	61.575	164.162
SUPA00119174.fits	W-C-RC	52519.410452	1.1340	61.756	165.657
SUPA00119184.fits	W-J-B	52519.415906	1.1300	62.151	169.722
SUPA00119194.fits	W-J-B	52519.417952	1.1290	62.266	171.273
SUPA00119204.fits	W-C-RC	52519.423293	1.1270	62.477	175.370
SUPA00119214.fits	W-C-RC	52519.425363	1.1270	62.524	176.969
SUPA00119224.fits	W-C-RC	52519.427410	1.1270	62.551	178.558
SUPA00119234.fits	W-C-RC	52519.429457	1.1270	62.559	180.147
SUPA00119244.fits	W-C-RC	52519.431506	1.1270	62.548	181.736
SUPA00119254.fits	W-C-RC	52519.433554	1.1270	62.517	183.324
SUPA00119264.fits	W-C-RC	52519.435603	1.1280	62.467	184.909
SUPA00119274.fits	W-C-RC	52519.437651	1.1290	62.398	186.484
SUPA00119284.fits	W-C-RC	52519.439700	1.1300	62.310	188.052
SUPA00119294.fits	W-C-RC	52519.441749	1.1310	62.203	189.611
SUPA00119304.fits	W-C-RC	52519.443797	1.1320	62.078	191.153
SUPA00119314.fits	W-C-RC	52519.445847	1.1340	61.934	192.689
SUPA00119324.fits	W-C-RC	52519.447894	1.1360	61.772	194.205
SUPA00119334.fits	W-C-RC	52519.449943	1.1380	61.593	195.703
SUPA00119344.fits	W-C-RC	52519.451992	1.1400	61.396	197.180
SUPA00119354.fits	W-C-RC	52519.454040	1.1430	61.182	198.642
SUPA00119364.fits	W-C-RC	52519.456089	1.1450	60.951	200.079
SUPA00119374.fits	W-C-RC	52519.458137	1.1480	60.705	201.496
SUPA00119384.fits	W-C-RC	52519.460210	1.1510	60.441	202.889
SUPA00119394.fits	W-C-RC	52519.462279	1.1550	60.158	204.287
SUPA00119404.fits	W-C-RC	52519.464340	1.1580	59.862	205.638

La suite, page suivante ...

ANNEXE D. DONNÉES SMBAS

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00119414.fits	W-C-RC	52519.466390	1.1620	59.554	206.958
SUPA00119424.fits	W-C-RC	52519.468439	1.1660	59.232	208.251
SUPA00119434.fits	W-C-RC	52519.470488	1.1700	58.896	209.518
SUPA00119444.fits	W-C-RC	52519.472536	1.1750	58.546	210.759
SUPA00119454.fits	W-C-RC	52519.474585	1.1800	58.183	211.974
SUPA00119464.fits	W-C-RC	52519.476633	1.1850	57.809	213.162
SUPA00119484.fits	W-C-RC	52519.480730	1.1950	57.025	215.464
SUPA00119494.fits	W-C-RC	52519.482779	1.2010	56.616	216.574
SUPA00119504.fits	W-C-RC	52519.484827	1.2070	56.196	217.659
SUPA00119514.fits	W-C-RC	52519.486876	1.2130	55.766	218.721
SUPA00119524.fits	W-C-RC	52519.488937	1.2200	55.323	219.763
SUPA00119534.fits	W-C-RC	52519.490985	1.2270	54.874	220.776
SUPA00119544.fits	W-C-RC	52519.493061	1.2340	54.408	221.775
SUPA00119554.fits	W-C-RC	52519.495136	1.2420	53.934	222.752
SUPA00119564.fits	W-C-RC	52519.497217	1.2490	53.450	223.707
SUPA00119574.fits	W-C-RC	52519.499296	1.2580	52.959	224.638
SUPA00119584.fits	W-C-RC	52519.501380	1.2660	52.457	225.549
SUPA00119594.fits	W-C-RC	52519.503453	1.2750	51.951	226.434
SUPA00119604.fits	W-C-RC	52519.505525	1.2840	51.439	227.296
SUPA00119614.fits	W-C-RC	52519.507603	1.2940	50.915	228.142
SUPA00119624.fits	W-C-RC	52519.509684	1.3040	50.385	228.967
SUPA00119634.fits	W-C-RC	52519.511760	1.3140	49.851	229.770
SUPA00119644.fits	W-C-RC	52519.513842	1.3250	49.308	230.557
SUPA00119654.fits	W-C-RC	52519.515934	1.3370	48.756	231.329
SUPA00119664.fits	W-C-RC	52519.518021	1.3480	48.200	232.080
SUPA00119674.fits	W-C-RC	52519.520101	1.3600	47.640	232.813
SUPA00119684.fits	W-C-RC	52519.522163	1.3730	47.080	233.521
SUPA00119694.fits	W-C-RC	52519.524247	1.3860	46.508	234.220
SUPA00119704.fits	W-C-RC	52519.526333	1.4000	45.931	234.904
SUPA00119714.fits	W-C-RC	52519.528416	1.4140	45.350	235.572
SUPA00119724.fits	W-C-RC	52519.530499	1.4290	44.764	236.224
SUPA00119734.fits	W-C-RC	52519.532578	1.4440	44.175	236.861
SUPA00119744.fits	W-C-RC	52519.534665	1.4600	43.580	237.486
SUPA00119754.fits	W-C-RC	52519.536741	1.4760	42.983	238.093
SUPA00119764.fits	W-C-RC	52519.538811	1.4930	42.385	238.687
SUPA00119774.fits	W-C-RC	52519.540880	1.5110	41.782	239.268
SUPA00119784.fits	W-C-RC	52519.542930	1.5290	41.182	239.830
SUPA00119794.fits	W-C-RC	52519.544978	1.5480	40.579	240.381
SUPA00119804.fits	W-C-RC	52519.547026	1.5680	39.973	240.920
SUPA00119814.fits	W-C-RC	52519.549075	1.5890	39.363	241.449
SUPA00119824.fits	W-C-RC	52519.551149	1.6100	38.744	241.975

La suite, page suivante ...

ANNEXE D. DONNÉES SMBAS

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00119834.fits	W-C-RC	52519.553196	1.6320	38.127	242.482
SUPA00119844.fits	W-C-RC	52519.555244	1.6560	37.510	242.980
SUPA00119854.fits	W-C-RC	52519.557293	1.6800	36.888	243.469
SUPA00119864.fits	W-C-RC	52519.559342	1.7050	36.265	243.949
SUPA00119874.fits	W-C-RC	52519.561390	1.7310	35.639	244.419
SUPA00119884.fits	W-C-RC	52519.563438	1.7580	35.010	244.881
SUPA00119894.fits	W-C-RC	52519.565492	1.7870	34.378	245.336
SUPA00119904.fits	W-C-RC	52519.567539	1.8170	33.745	245.780
SUPA00119914.fits	W-C-RC	52519.569585	1.8480	33.110	246.218
SUPA00119924.fits	W-C-RC	52519.571634	1.8810	32.473	246.648
SUPA00119934.fits	W-C-RC	52519.573681	1.9150	31.833	247.070
SUPA00119944.fits	W-C-RC	52519.575741	1.9510	31.189	247.487
SUPA00119954.fits	W-C-RC	52519.577791	1.9880	30.543	247.897
SUPA00119964.fits	W-C-RC	52519.579843	2.0270	29.898	248.299
SUPA00119974.fits	W-C-RC	52519.581904	2.0690	29.246	248.698
SUPA00119984.fits	W-J-B	52519.588455	2.2160	27.164	249.922
SUPA00119994.fits	W-J-B	52519.590502	2.2670	26.511	250.292
SUPA00120004.fits	W-J-B	52519.594000	2.3610	25.391	250.912
SUPA00120014.fits	W-C-RC	52519.600907	2.5760	23.167	252.094
SUPA00120024.fits	W-C-RC	52519.602978	2.6490	22.497	252.437
SUPA00120034.fits	W-C-RC	52519.605050	2.7270	21.826	252.777
SUPA00120044.fits	W-C-RC	52519.607127	2.8110	21.150	253.113
SUPA00120054.fits	W-C-RC	52519.609173	2.8990	20.486	253.439
SUPA00120064.fits	W-C-RC	52519.611220	2.9940	19.819	253.761
SUPA00120074.fits	W-C-RC	52519.613267	3.0950	19.151	254.081
SUPA00120084.fits	W-C-RC	52519.615313	3.2040	18.483	254.396
SUPA00120094.fits	W-C-RC	52519.617363	3.3220	17.811	254.707
SUPA00120104.fits	W-C-RC	52519.619411	3.4490	17.139	255.015

Fin de la liste pour C4

TAB. D.6: Liste des images pour le Chip 5 ; centré en $\alpha = 22 : 41 : 38.9184$, $\delta = -07 : 30 : 43 : 3375$

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00118535.fits	W-J-B	52519.266795	2.2280	26.114	109.486
SUPA00118545.fits	W-J-B	52519.268843	2.1790	26.769	109.854
SUPA00118555.fits	W-C-RC	52519.276127	2.0240	29.086	111.206
SUPA00118565.fits	W-C-RC	52519.278175	1.9840	29.731	111.598
SUPA00118575.fits	W-C-RC	52519.280221	1.9470	30.378	111.999
SUPA00118585.fits	W-C-RC	52519.282270	1.9110	31.023	112.406
SUPA00118595.fits	W-C-RC	52519.285021	1.8660	31.884	112.964
SUPA00118605.fits	W-C-RC	52519.287073	1.8340	32.524	113.388
SUPA00118615.fits	W-C-RC	52519.289125	1.8040	33.164	113.819
SUPA00118625.fits	W-C-RC	52519.291172	1.7740	33.799	114.257
SUPA00118635.fits	W-C-RC	52519.293218	1.7460	34.430	114.703
SUPA00118645.fits	W-C-RC	52519.295304	1.7190	35.073	115.165
SUPA00118655.fits	W-C-RC	52519.297387	1.6930	35.712	115.636
SUPA00118665.fits	W-C-RC	52519.299434	1.6680	36.338	116.107
SUPA00118675.fits	W-C-RC	52519.301483	1.6450	36.961	116.588
SUPA00118685.fits	W-C-RC	52519.303531	1.6220	37.581	117.077
SUPA00118695.fits	W-C-RC	52519.305580	1.6000	38.199	117.576
SUPA00118705.fits	W-C-RC	52519.307629	1.5790	38.815	118.086
SUPA00118715.fits	W-C-RC	52519.309677	1.5590	39.427	118.606
SUPA00118735.fits	W-C-RC	52519.313774	1.5210	40.642	119.677
SUPA00118745.fits	W-C-RC	52519.315823	1.5030	41.245	120.229
SUPA00118755.fits	W-C-RC	52519.317871	1.4860	41.844	120.792
SUPA00118765.fits	W-C-RC	52519.319920	1.4690	42.441	121.369
SUPA00118775.fits	W-C-RC	52519.321969	1.4530	43.032	121.957
SUPA00118805.fits	W-J-B	52519.330708	1.3910	45.514	124.616
SUPA00118815.fits	W-J-B	52519.332755	1.3780	46.084	125.276
SUPA00118835.fits	W-C-RC	52519.340730	1.3320	48.257	127.996
SUPA00118845.fits	W-C-RC	52519.342779	1.3210	48.803	128.736
SUPA00118855.fits	W-C-RC	52519.344827	1.3100	49.342	129.493
SUPA00118865.fits	W-C-RC	52519.346877	1.3000	49.876	130.267
SUPA00118875.fits	W-C-RC	52519.348924	1.2900	50.404	131.061
SUPA00118885.fits	W-C-RC	52519.350973	1.2810	50.925	131.875
SUPA00118895.fits	W-C-RC	52519.353022	1.2720	51.440	132.707
SUPA00118905.fits	W-C-RC	52519.355071	1.2630	51.948	133.560
SUPA00118915.fits	W-C-RC	52519.357119	1.2550	52.448	134.435
SUPA00118935.fits	W-C-RC	52519.361217	1.2390	53.425	136.247
SUPA00118945.fits	W-C-RC	52519.363265	1.2320	53.903	137.184
SUPA00118955.fits	W-C-RC	52519.365313	1.2250	54.372	138.148

La suite, page suivante ...

ANNEXE D. DONNÉES SMBAS

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00118965.fits	W-C-RC	52519.367363	1.2180	54.831	139.133
SUPA00118975.fits	W-C-RC	52519.369420	1.2120	55.284	140.147
SUPA00118985.fits	W-C-RC	52519.371471	1.2050	55.725	141.183
SUPA00118995.fits	W-C-RC	52519.373545	1.1990	56.157	142.242
SUPA00119005.fits	W-C-RC	52519.375592	1.1940	56.582	143.338
SUPA00119015.fits	W-C-RC	52519.377640	1.1880	56.992	144.447
SUPA00119025.fits	W-C-RC	52519.379712	1.1830	57.395	145.595
SUPA00119035.fits	W-C-RC	52519.381760	1.1780	57.782	146.755
SUPA00119045.fits	W-C-RC	52519.383809	1.1740	58.158	147.943
SUPA00119055.fits	W-C-RC	52519.385859	1.1690	58.520	149.158
SUPA00119065.fits	W-C-RC	52519.387906	1.1650	58.871	150.396
SUPA00119075.fits	W-C-RC	52519.389954	1.1610	59.208	151.660
SUPA00119095.fits	W-C-RC	52519.394052	1.1540	59.840	154.270
SUPA00119105.fits	W-C-RC	52519.396100	1.1510	60.135	155.610
SUPA00119115.fits	W-C-RC	52519.398149	1.1480	60.415	156.977
SUPA00119125.fits	W-C-RC	52519.400198	1.1450	60.679	158.369
SUPA00119135.fits	W-C-RC	52519.402246	1.1420	60.928	159.782
SUPA00119145.fits	W-C-RC	52519.404295	1.1400	61.160	161.218
SUPA00119155.fits	W-C-RC	52519.406345	1.1370	61.376	162.674
SUPA00119165.fits	W-C-RC	52519.408404	1.1350	61.575	164.162
SUPA00119175.fits	W-C-RC	52519.410452	1.1340	61.756	165.657
SUPA00119185.fits	W-J-B	52519.415906	1.1300	62.151	169.722
SUPA00119195.fits	W-J-B	52519.417952	1.1290	62.266	171.273
SUPA00119205.fits	W-C-RC	52519.423293	1.1270	62.477	175.370
SUPA00119215.fits	W-C-RC	52519.425363	1.1270	62.524	176.969
SUPA00119225.fits	W-C-RC	52519.427410	1.1270	62.551	178.558
SUPA00119235.fits	W-C-RC	52519.429457	1.1270	62.559	180.147
SUPA00119245.fits	W-C-RC	52519.431506	1.1270	62.548	181.736
SUPA00119255.fits	W-C-RC	52519.433554	1.1270	62.517	183.324
SUPA00119265.fits	W-C-RC	52519.435603	1.1280	62.467	184.909
SUPA00119275.fits	W-C-RC	52519.437651	1.1290	62.398	186.484
SUPA00119285.fits	W-C-RC	52519.439700	1.1300	62.310	188.052
SUPA00119295.fits	W-C-RC	52519.441749	1.1310	62.203	189.611
SUPA00119305.fits	W-C-RC	52519.443797	1.1320	62.078	191.153
SUPA00119315.fits	W-C-RC	52519.445847	1.1340	61.934	192.689
SUPA00119325.fits	W-C-RC	52519.447894	1.1360	61.772	194.205
SUPA00119335.fits	W-C-RC	52519.449943	1.1380	61.593	195.703
SUPA00119345.fits	W-C-RC	52519.451992	1.1400	61.396	197.180
SUPA00119355.fits	W-C-RC	52519.454040	1.1430	61.182	198.642
SUPA00119365.fits	W-C-RC	52519.456089	1.1450	60.951	200.079
SUPA00119375.fits	W-C-RC	52519.458137	1.1480	60.705	201.496

La suite, page suivante ...

ANNEXE D. DONNÉES SMBAS

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00119385.fits	W-C-RC	52519.460210	1.1510	60.441	202.889
SUPA00119395.fits	W-C-RC	52519.462279	1.1550	60.158	204.287
SUPA00119405.fits	W-C-RC	52519.464340	1.1580	59.862	205.638
SUPA00119415.fits	W-C-RC	52519.466390	1.1620	59.554	206.958
SUPA00119425.fits	W-C-RC	52519.468439	1.1660	59.232	208.251
SUPA00119435.fits	W-C-RC	52519.470488	1.1700	58.896	209.518
SUPA00119445.fits	W-C-RC	52519.472536	1.1750	58.546	210.759
SUPA00119455.fits	W-C-RC	52519.474585	1.1800	58.183	211.974
SUPA00119465.fits	W-C-RC	52519.476633	1.1850	57.809	213.162
SUPA00119475.fits	W-C-RC	52519.478682	1.1900	57.423	214.325
SUPA00119485.fits	W-C-RC	52519.480730	1.1950	57.025	215.464
SUPA00119495.fits	W-C-RC	52519.482779	1.2010	56.616	216.574
SUPA00119505.fits	W-C-RC	52519.484827	1.2070	56.196	217.659
SUPA00119525.fits	W-C-RC	52519.488937	1.2200	55.323	219.763
SUPA00119535.fits	W-C-RC	52519.490985	1.2270	54.874	220.776
SUPA00119545.fits	W-C-RC	52519.493061	1.2340	54.408	221.775
SUPA00119555.fits	W-C-RC	52519.495136	1.2420	53.934	222.752
SUPA00119575.fits	W-C-RC	52519.499296	1.2580	52.959	224.638
SUPA00119595.fits	W-C-RC	52519.503453	1.2750	51.951	226.434
SUPA00119605.fits	W-C-RC	52519.505525	1.2840	51.439	227.296
SUPA00119615.fits	W-C-RC	52519.507603	1.2940	50.915	228.142
SUPA00119625.fits	W-C-RC	52519.509684	1.3040	50.385	228.967
SUPA00119635.fits	W-C-RC	52519.511760	1.3140	49.851	229.770
SUPA00119645.fits	W-C-RC	52519.513842	1.3250	49.308	230.557
SUPA00119655.fits	W-C-RC	52519.515934	1.3370	48.756	231.329
SUPA00119665.fits	W-C-RC	52519.518021	1.3480	48.200	232.080
SUPA00119675.fits	W-C-RC	52519.520101	1.3600	47.640	232.813
SUPA00119685.fits	W-C-RC	52519.522163	1.3730	47.080	233.521
SUPA00119695.fits	W-C-RC	52519.524247	1.3860	46.508	234.220
SUPA00119705.fits	W-C-RC	52519.526333	1.4000	45.931	234.904
SUPA00119715.fits	W-C-RC	52519.528416	1.4140	45.350	235.572
SUPA00119725.fits	W-C-RC	52519.530499	1.4290	44.764	236.224
SUPA00119735.fits	W-C-RC	52519.532578	1.4440	44.175	236.861
SUPA00119745.fits	W-C-RC	52519.534665	1.4600	43.580	237.486
SUPA00119755.fits	W-C-RC	52519.536741	1.4760	42.983	238.093
SUPA00119765.fits	W-C-RC	52519.538811	1.4930	42.385	238.687
SUPA00119775.fits	W-C-RC	52519.540880	1.5110	41.782	239.268
SUPA00119785.fits	W-C-RC	52519.542930	1.5290	41.182	239.830
SUPA00119795.fits	W-C-RC	52519.544978	1.5480	40.579	240.381
SUPA00119805.fits	W-C-RC	52519.547026	1.5680	39.973	240.920
SUPA00119815.fits	W-C-RC	52519.549075	1.5890	39.363	241.449

La suite, page suivante ...

ANNEXE D. DONNÉES SMBAS

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00119825.fits	W-C-RC	52519.551149	1.6100	38.744	241.975
SUPA00119835.fits	W-C-RC	52519.553196	1.6320	38.127	242.482
SUPA00119845.fits	W-C-RC	52519.555244	1.6560	37.510	242.980
SUPA00119855.fits	W-C-RC	52519.557293	1.6800	36.888	243.469
SUPA00119865.fits	W-C-RC	52519.559342	1.7050	36.265	243.949
SUPA00119875.fits	W-C-RC	52519.561390	1.7310	35.639	244.419
SUPA00119885.fits	W-C-RC	52519.563438	1.7580	35.010	244.881
SUPA00119895.fits	W-C-RC	52519.565492	1.7870	34.378	245.336
SUPA00119905.fits	W-C-RC	52519.567539	1.8170	33.745	245.780
SUPA00119915.fits	W-C-RC	52519.569585	1.8480	33.110	246.218
SUPA00119925.fits	W-C-RC	52519.571634	1.8810	32.473	246.648
SUPA00119935.fits	W-C-RC	52519.573681	1.9150	31.833	247.070
SUPA00119945.fits	W-C-RC	52519.575741	1.9510	31.189	247.487
SUPA00119955.fits	W-C-RC	52519.577791	1.9880	30.543	247.897
SUPA00119965.fits	W-C-RC	52519.579843	2.0270	29.898	248.299
SUPA00119975.fits	W-C-RC	52519.581904	2.0690	29.246	248.698
SUPA00119985.fits	W-J-B	52519.588455	2.2160	27.164	249.922
SUPA00119995.fits	W-J-B	52519.590502	2.2670	26.511	250.292
SUPA00120005.fits	W-J-B	52519.594000	2.3610	25.391	250.912
SUPA00120015.fits	W-C-RC	52519.600907	2.5760	23.167	252.094
SUPA00120025.fits	W-C-RC	52519.602978	2.6490	22.497	252.437
SUPA00120035.fits	W-C-RC	52519.605050	2.7270	21.826	252.777
SUPA00120045.fits	W-C-RC	52519.607127	2.8110	21.150	253.113
SUPA00120055.fits	W-C-RC	52519.609173	2.8990	20.486	253.439
SUPA00120075.fits	W-C-RC	52519.613267	3.0950	19.151	254.081
SUPA00120085.fits	W-C-RC	52519.615313	3.2040	18.483	254.396

Fin de la liste pour C5

TAB. D.7: Liste des images pour le Chip 6
centré en $\alpha = 22 : 42 : 35.5920$, $\delta = -07 : 44 : 21.2132$

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00118536.fits	W-J-B	52519.266795	2.2280	26.114	109.486
SUPA00118546.fits	W-J-B	52519.268843	2.1790	26.769	109.854
SUPA00118556.fits	W-C-RC	52519.276127	2.0240	29.086	111.206
SUPA00118566.fits	W-C-RC	52519.278175	1.9840	29.731	111.598
SUPA00118576.fits	W-C-RC	52519.280221	1.9470	30.378	111.999
SUPA00118586.fits	W-C-RC	52519.282270	1.9110	31.023	112.406
SUPA00118596.fits	W-C-RC	52519.285021	1.8660	31.884	112.964
SUPA00118606.fits	W-C-RC	52519.287073	1.8340	32.524	113.388
SUPA00118616.fits	W-C-RC	52519.289125	1.8040	33.164	113.819
SUPA00118626.fits	W-C-RC	52519.291172	1.7740	33.799	114.257
SUPA00118636.fits	W-C-RC	52519.293218	1.7460	34.430	114.703
SUPA00118646.fits	W-C-RC	52519.295304	1.7190	35.073	115.165
SUPA00118666.fits	W-C-RC	52519.299434	1.6680	36.338	116.107
SUPA00118676.fits	W-C-RC	52519.301483	1.6450	36.961	116.588
SUPA00118686.fits	W-C-RC	52519.303531	1.6220	37.581	117.077
SUPA00118696.fits	W-C-RC	52519.305580	1.6000	38.199	117.576
SUPA00118706.fits	W-C-RC	52519.307629	1.5790	38.815	118.086
SUPA00118716.fits	W-C-RC	52519.309677	1.5590	39.427	118.606
SUPA00118726.fits	W-C-RC	52519.311726	1.5390	40.036	119.136
SUPA00118736.fits	W-C-RC	52519.313774	1.5210	40.642	119.677
SUPA00118746.fits	W-C-RC	52519.315823	1.5030	41.245	120.229
SUPA00118756.fits	W-C-RC	52519.317871	1.4860	41.844	120.792
SUPA00118776.fits	W-C-RC	52519.321969	1.4530	43.032	121.957
SUPA00118786.fits	W-C-RC	52519.324017	1.4380	43.621	122.558
SUPA00118806.fits	W-J-B	52519.330708	1.3910	45.514	124.616
SUPA00118816.fits	W-J-B	52519.332755	1.3780	46.084	125.276
SUPA00118826.fits	W-C-RC	52519.338680	1.3430	47.705	127.273
SUPA00118836.fits	W-C-RC	52519.340730	1.3320	48.257	127.996
SUPA00118846.fits	W-C-RC	52519.342779	1.3210	48.803	128.736
SUPA00118856.fits	W-C-RC	52519.344827	1.3100	49.342	129.493
SUPA00118866.fits	W-C-RC	52519.346877	1.3000	49.876	130.267
SUPA00118876.fits	W-C-RC	52519.348924	1.2900	50.404	131.061
SUPA00118886.fits	W-C-RC	52519.350973	1.2810	50.925	131.875
SUPA00118896.fits	W-C-RC	52519.353022	1.2720	51.440	132.707
SUPA00118906.fits	W-C-RC	52519.355071	1.2630	51.948	133.560
SUPA00118916.fits	W-C-RC	52519.357119	1.2550	52.448	134.435
SUPA00118926.fits	W-C-RC	52519.359167	1.2470	52.940	135.329
SUPA00118936.fits	W-C-RC	52519.361217	1.2390	53.425	136.247

La suite, page suivante ...

ANNEXE D. DONNÉES SMBAS

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00118946.fits	W-C-RC	52519.363265	1.2320	53.903	137.184
SUPA00118956.fits	W-C-RC	52519.365313	1.2250	54.372	138.148
SUPA00118966.fits	W-C-RC	52519.367363	1.2180	54.831	139.133
SUPA00118976.fits	W-C-RC	52519.369420	1.2120	55.284	140.147
SUPA00118986.fits	W-C-RC	52519.371471	1.2050	55.725	141.183
SUPA00118996.fits	W-C-RC	52519.373545	1.1990	56.157	142.242
SUPA00119006.fits	W-C-RC	52519.375592	1.1940	56.582	143.338
SUPA00119016.fits	W-C-RC	52519.377640	1.1880	56.992	144.447
SUPA00119026.fits	W-C-RC	52519.379712	1.1830	57.395	145.595
SUPA00119036.fits	W-C-RC	52519.381760	1.1780	57.782	146.755
SUPA00119046.fits	W-C-RC	52519.383809	1.1740	58.158	147.943
SUPA00119056.fits	W-C-RC	52519.385859	1.1690	58.520	149.158
SUPA00119066.fits	W-C-RC	52519.387906	1.1650	58.871	150.396
SUPA00119086.fits	W-C-RC	52519.392003	1.1570	59.531	152.953
SUPA00119096.fits	W-C-RC	52519.394052	1.1540	59.840	154.270
SUPA00119106.fits	W-C-RC	52519.396100	1.1510	60.135	155.610
SUPA00119116.fits	W-C-RC	52519.398149	1.1480	60.415	156.977
SUPA00119126.fits	W-C-RC	52519.400198	1.1450	60.679	158.369
SUPA00119136.fits	W-C-RC	52519.402246	1.1420	60.928	159.782
SUPA00119146.fits	W-C-RC	52519.404295	1.1400	61.160	161.218
SUPA00119156.fits	W-C-RC	52519.406345	1.1370	61.376	162.674
SUPA00119166.fits	W-C-RC	52519.408404	1.1350	61.575	164.162
SUPA00119176.fits	W-C-RC	52519.410452	1.1340	61.756	165.657
SUPA00119186.fits	W-J-B	52519.415906	1.1300	62.151	169.722
SUPA00119196.fits	W-J-B	52519.417952	1.1290	62.266	171.273
SUPA00119206.fits	W-C-RC	52519.423293	1.1270	62.477	175.370
SUPA00119216.fits	W-C-RC	52519.425363	1.1270	62.524	176.969
SUPA00119226.fits	W-C-RC	52519.427410	1.1270	62.551	178.558
SUPA00119236.fits	W-C-RC	52519.429457	1.1270	62.559	180.147
SUPA00119246.fits	W-C-RC	52519.431506	1.1270	62.548	181.736
SUPA00119256.fits	W-C-RC	52519.433554	1.1270	62.517	183.324
SUPA00119266.fits	W-C-RC	52519.435603	1.1280	62.467	184.909
SUPA00119276.fits	W-C-RC	52519.437651	1.1290	62.398	186.484
SUPA00119286.fits	W-C-RC	52519.439700	1.1300	62.310	188.052
SUPA00119296.fits	W-C-RC	52519.441749	1.1310	62.203	189.611
SUPA00119306.fits	W-C-RC	52519.443797	1.1320	62.078	191.153
SUPA00119316.fits	W-C-RC	52519.445847	1.1340	61.934	192.689
SUPA00119326.fits	W-C-RC	52519.447894	1.1360	61.772	194.205
SUPA00119346.fits	W-C-RC	52519.451992	1.1400	61.396	197.180
SUPA00119356.fits	W-C-RC	52519.454040	1.1430	61.182	198.642
SUPA00119366.fits	W-C-RC	52519.456089	1.1450	60.951	200.079

La suite, page suivante ...

ANNEXE D. DONNÉES SMBAS

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00119376.fits	W-C-RC	52519.458137	1.1480	60.705	201.496
SUPA00119386.fits	W-C-RC	52519.460210	1.1510	60.441	202.889
SUPA00119396.fits	W-C-RC	52519.462279	1.1550	60.158	204.287
SUPA00119406.fits	W-C-RC	52519.464340	1.1580	59.862	205.638
SUPA00119416.fits	W-C-RC	52519.466390	1.1620	59.554	206.958
SUPA00119426.fits	W-C-RC	52519.468439	1.1660	59.232	208.251
SUPA00119436.fits	W-C-RC	52519.470488	1.1700	58.896	209.518
SUPA00119446.fits	W-C-RC	52519.472536	1.1750	58.546	210.759
SUPA00119456.fits	W-C-RC	52519.474585	1.1800	58.183	211.974
SUPA00119466.fits	W-C-RC	52519.476633	1.1850	57.809	213.162
SUPA00119476.fits	W-C-RC	52519.478682	1.1900	57.423	214.325
SUPA00119486.fits	W-C-RC	52519.480730	1.1950	57.025	215.464
SUPA00119496.fits	W-C-RC	52519.482779	1.2010	56.616	216.574
SUPA00119506.fits	W-C-RC	52519.484827	1.2070	56.196	217.659
SUPA00119516.fits	W-C-RC	52519.486876	1.2130	55.766	218.721
SUPA00119526.fits	W-C-RC	52519.488937	1.2200	55.323	219.763
SUPA00119536.fits	W-C-RC	52519.490985	1.2270	54.874	220.776
SUPA00119546.fits	W-C-RC	52519.493061	1.2340	54.408	221.775
SUPA00119556.fits	W-C-RC	52519.495136	1.2420	53.934	222.752
SUPA00119566.fits	W-C-RC	52519.497217	1.2490	53.450	223.707
SUPA00119576.fits	W-C-RC	52519.499296	1.2580	52.959	224.638
SUPA00119586.fits	W-C-RC	52519.501380	1.2660	52.457	225.549
SUPA00119596.fits	W-C-RC	52519.503453	1.2750	51.951	226.434
SUPA00119606.fits	W-C-RC	52519.505525	1.2840	51.439	227.296
SUPA00119616.fits	W-C-RC	52519.507603	1.2940	50.915	228.142
SUPA00119626.fits	W-C-RC	52519.509684	1.3040	50.385	228.967
SUPA00119636.fits	W-C-RC	52519.511760	1.3140	49.851	229.770
SUPA00119646.fits	W-C-RC	52519.513842	1.3250	49.308	230.557
SUPA00119656.fits	W-C-RC	52519.515934	1.3370	48.756	231.329
SUPA00119666.fits	W-C-RC	52519.518021	1.3480	48.200	232.080
SUPA00119676.fits	W-C-RC	52519.520101	1.3600	47.640	232.813
SUPA00119686.fits	W-C-RC	52519.522163	1.3730	47.080	233.521
SUPA00119696.fits	W-C-RC	52519.524247	1.3860	46.508	234.220
SUPA00119716.fits	W-C-RC	52519.528416	1.4140	45.350	235.572
SUPA00119726.fits	W-C-RC	52519.530499	1.4290	44.764	236.224
SUPA00119736.fits	W-C-RC	52519.532578	1.4440	44.175	236.861
SUPA00119746.fits	W-C-RC	52519.534665	1.4600	43.580	237.486
SUPA00119756.fits	W-C-RC	52519.536741	1.4760	42.983	238.093
SUPA00119766.fits	W-C-RC	52519.538811	1.4930	42.385	238.687
SUPA00119776.fits	W-C-RC	52519.540880	1.5110	41.782	239.268
SUPA00119786.fits	W-C-RC	52519.542930	1.5290	41.182	239.830

La suite, page suivante ...

ANNEXE D. DONNÉES SMBAS

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00119796.fits	W-C-RC	52519.544978	1.5480	40.579	240.381
SUPA00119806.fits	W-C-RC	52519.547026	1.5680	39.973	240.920
SUPA00119816.fits	W-C-RC	52519.549075	1.5890	39.363	241.449
SUPA00119826.fits	W-C-RC	52519.551149	1.6100	38.744	241.975
SUPA00119836.fits	W-C-RC	52519.553196	1.6320	38.127	242.482
SUPA00119846.fits	W-C-RC	52519.555244	1.6560	37.510	242.980
SUPA00119856.fits	W-C-RC	52519.557293	1.6800	36.888	243.469
SUPA00119866.fits	W-C-RC	52519.559342	1.7050	36.265	243.949
SUPA00119876.fits	W-C-RC	52519.561390	1.7310	35.639	244.419
SUPA00119886.fits	W-C-RC	52519.563438	1.7580	35.010	244.881
SUPA00119896.fits	W-C-RC	52519.565492	1.7870	34.378	245.336
SUPA00119906.fits	W-C-RC	52519.567539	1.8170	33.745	245.780
SUPA00119916.fits	W-C-RC	52519.569585	1.8480	33.110	246.218
SUPA00119926.fits	W-C-RC	52519.571634	1.8810	32.473	246.648
SUPA00119936.fits	W-C-RC	52519.573681	1.9150	31.833	247.070
SUPA00119946.fits	W-C-RC	52519.575741	1.9510	31.189	247.487
SUPA00119956.fits	W-C-RC	52519.577791	1.9880	30.543	247.897
SUPA00119966.fits	W-C-RC	52519.579843	2.0270	29.898	248.299
SUPA00119976.fits	W-C-RC	52519.581904	2.0690	29.246	248.698
SUPA00119986.fits	W-J-B	52519.588455	2.2160	27.164	249.922
SUPA00119996.fits	W-J-B	52519.590502	2.2670	26.511	250.292
SUPA00120006.fits	W-J-B	52519.594000	2.3610	25.391	250.912
SUPA00120016.fits	W-C-RC	52519.600907	2.5760	23.167	252.094
SUPA00120026.fits	W-C-RC	52519.602978	2.6490	22.497	252.437
SUPA00120036.fits	W-C-RC	52519.605050	2.7270	21.826	252.777
SUPA00120046.fits	W-C-RC	52519.607127	2.8110	21.150	253.113
SUPA00120056.fits	W-C-RC	52519.609173	2.8990	20.486	253.439
SUPA00120066.fits	W-C-RC	52519.611220	2.9940	19.819	253.761
SUPA00120076.fits	W-C-RC	52519.613267	3.0950	19.151	254.081
SUPA00120086.fits	W-C-RC	52519.615313	3.2040	18.483	254.396
SUPA00120096.fits	W-C-RC	52519.617363	3.3220	17.811	254.707
SUPA00120106.fits	W-C-RC	52519.619411	3.4490	17.139	255.015

Fin de la liste pour C6

TAB. D.8: Liste des images pour le Chip 7.
centré en $\alpha = \alpha = 22 : 42 : 07.3536$, $\delta = -07 : 44 : 20.9400$

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00118537.fits	W-J-B	52519.266795	2.2280	26.114	109.486
SUPA00118547.fits	W-J-B	52519.268843	2.1790	26.769	109.854
SUPA00118557.fits	W-C-RC	52519.276127	2.0240	29.086	111.206
SUPA00118567.fits	W-C-RC	52519.278175	1.9840	29.731	111.598
SUPA00118577.fits	W-C-RC	52519.280221	1.9470	30.378	111.999
SUPA00118587.fits	W-C-RC	52519.282270	1.9110	31.023	112.406
SUPA00118597.fits	W-C-RC	52519.285021	1.8660	31.884	112.964
SUPA00118607.fits	W-C-RC	52519.287073	1.8340	32.524	113.388
SUPA00118617.fits	W-C-RC	52519.289125	1.8040	33.164	113.819
SUPA00118627.fits	W-C-RC	52519.291172	1.7740	33.799	114.257
SUPA00118637.fits	W-C-RC	52519.293218	1.7460	34.430	114.703
SUPA00118647.fits	W-C-RC	52519.295304	1.7190	35.073	115.165
SUPA00118657.fits	W-C-RC	52519.297387	1.6930	35.712	115.636
SUPA00118667.fits	W-C-RC	52519.299434	1.6680	36.338	116.107
SUPA00118677.fits	W-C-RC	52519.301483	1.6450	36.961	116.588
SUPA00118687.fits	W-C-RC	52519.303531	1.6220	37.581	117.077
SUPA00118697.fits	W-C-RC	52519.305580	1.6000	38.199	117.576
SUPA00118707.fits	W-C-RC	52519.307629	1.5790	38.815	118.086
SUPA00118717.fits	W-C-RC	52519.309677	1.5590	39.427	118.606
SUPA00118727.fits	W-C-RC	52519.311726	1.5390	40.036	119.136
SUPA00118737.fits	W-C-RC	52519.313774	1.5210	40.642	119.677
SUPA00118747.fits	W-C-RC	52519.315823	1.5030	41.245	120.229
SUPA00118757.fits	W-C-RC	52519.317871	1.4860	41.844	120.792
SUPA00118767.fits	W-C-RC	52519.319920	1.4690	42.441	121.369
SUPA00118777.fits	W-C-RC	52519.321969	1.4530	43.032	121.957
SUPA00118787.fits	W-C-RC	52519.324017	1.4380	43.621	122.558
SUPA00118807.fits	W-J-B	52519.330708	1.3910	45.514	124.616
SUPA00118817.fits	W-J-B	52519.332755	1.3780	46.084	125.276
SUPA00118827.fits	W-C-RC	52519.338680	1.3430	47.705	127.273
SUPA00118837.fits	W-C-RC	52519.340730	1.3320	48.257	127.996
SUPA00118847.fits	W-C-RC	52519.342779	1.3210	48.803	128.736
SUPA00118857.fits	W-C-RC	52519.344827	1.3100	49.342	129.493
SUPA00118867.fits	W-C-RC	52519.346877	1.3000	49.876	130.267
SUPA00118877.fits	W-C-RC	52519.348924	1.2900	50.404	131.061
SUPA00118887.fits	W-C-RC	52519.350973	1.2810	50.925	131.875
SUPA00118897.fits	W-C-RC	52519.353022	1.2720	51.440	132.707
SUPA00118917.fits	W-C-RC	52519.357119	1.2550	52.448	134.435
SUPA00118927.fits	W-C-RC	52519.359167	1.2470	52.940	135.329

La suite, page suivante ...

ANNEXE D. DONNÉES SMBAS

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00118937.fits	W-C-RC	52519.361217	1.2390	53.425	136.247
SUPA00118947.fits	W-C-RC	52519.363265	1.2320	53.903	137.184
SUPA00118957.fits	W-C-RC	52519.365313	1.2250	54.372	138.148
SUPA00118967.fits	W-C-RC	52519.367363	1.2180	54.831	139.133
SUPA00118977.fits	W-C-RC	52519.369420	1.2120	55.284	140.147
SUPA00118987.fits	W-C-RC	52519.371471	1.2050	55.725	141.183
SUPA00118997.fits	W-C-RC	52519.373545	1.1990	56.157	142.242
SUPA00119017.fits	W-C-RC	52519.377640	1.1880	56.992	144.447
SUPA00119027.fits	W-C-RC	52519.379712	1.1830	57.395	145.595
SUPA00119037.fits	W-C-RC	52519.381760	1.1780	57.782	146.755
SUPA00119047.fits	W-C-RC	52519.383809	1.1740	58.158	147.943
SUPA00119057.fits	W-C-RC	52519.385859	1.1690	58.520	149.158
SUPA00119067.fits	W-C-RC	52519.387906	1.1650	58.871	150.396
SUPA00119077.fits	W-C-RC	52519.389954	1.1610	59.208	151.660
SUPA00119087.fits	W-C-RC	52519.392003	1.1570	59.531	152.953
SUPA00119097.fits	W-C-RC	52519.394052	1.1540	59.840	154.270
SUPA00119107.fits	W-C-RC	52519.396100	1.1510	60.135	155.610
SUPA00119117.fits	W-C-RC	52519.398149	1.1480	60.415	156.977
SUPA00119127.fits	W-C-RC	52519.400198	1.1450	60.679	158.369
SUPA00119137.fits	W-C-RC	52519.402246	1.1420	60.928	159.782
SUPA00119147.fits	W-C-RC	52519.404295	1.1400	61.160	161.218
SUPA00119157.fits	W-C-RC	52519.406345	1.1370	61.376	162.674
SUPA00119167.fits	W-C-RC	52519.408404	1.1350	61.575	164.162
SUPA00119177.fits	W-C-RC	52519.410452	1.1340	61.756	165.657
SUPA00119187.fits	W-J-B	52519.415906	1.1300	62.151	169.722
SUPA00119197.fits	W-J-B	52519.417952	1.1290	62.266	171.273
SUPA00119207.fits	W-C-RC	52519.423293	1.1270	62.477	175.370
SUPA00119217.fits	W-C-RC	52519.425363	1.1270	62.524	176.969
SUPA00119227.fits	W-C-RC	52519.427410	1.1270	62.551	178.558
SUPA00119237.fits	W-C-RC	52519.429457	1.1270	62.559	180.147
SUPA00119247.fits	W-C-RC	52519.431506	1.1270	62.548	181.736
SUPA00119257.fits	W-C-RC	52519.433554	1.1270	62.517	183.324
SUPA00119267.fits	W-C-RC	52519.435603	1.1280	62.467	184.909
SUPA00119277.fits	W-C-RC	52519.437651	1.1290	62.398	186.484
SUPA00119287.fits	W-C-RC	52519.439700	1.1300	62.310	188.052
SUPA00119297.fits	W-C-RC	52519.441749	1.1310	62.203	189.611
SUPA00119307.fits	W-C-RC	52519.443797	1.1320	62.078	191.153
SUPA00119317.fits	W-C-RC	52519.445847	1.1340	61.934	192.689
SUPA00119327.fits	W-C-RC	52519.447894	1.1360	61.772	194.205
SUPA00119337.fits	W-C-RC	52519.449943	1.1380	61.593	195.703
SUPA00119347.fits	W-C-RC	52519.451992	1.1400	61.396	197.180

La suite, page suivante ...

ANNEXE D. DONNÉES SMBAS

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00119357.fits	W-C-RC	52519.454040	1.1430	61.182	198.642
SUPA00119367.fits	W-C-RC	52519.456089	1.1450	60.951	200.079
SUPA00119377.fits	W-C-RC	52519.458137	1.1480	60.705	201.496
SUPA00119387.fits	W-C-RC	52519.460210	1.1510	60.441	202.889
SUPA00119397.fits	W-C-RC	52519.462279	1.1550	60.158	204.287
SUPA00119407.fits	W-C-RC	52519.464340	1.1580	59.862	205.638
SUPA00119417.fits	W-C-RC	52519.466390	1.1620	59.554	206.958
SUPA00119437.fits	W-C-RC	52519.470488	1.1700	58.896	209.518
SUPA00119447.fits	W-C-RC	52519.472536	1.1750	58.546	210.759
SUPA00119457.fits	W-C-RC	52519.474585	1.1800	58.183	211.974
SUPA00119467.fits	W-C-RC	52519.476633	1.1850	57.809	213.162
SUPA00119477.fits	W-C-RC	52519.478682	1.1900	57.423	214.325
SUPA00119487.fits	W-C-RC	52519.480730	1.1950	57.025	215.464
SUPA00119497.fits	W-C-RC	52519.482779	1.2010	56.616	216.574
SUPA00119507.fits	W-C-RC	52519.484827	1.2070	56.196	217.659
SUPA00119517.fits	W-C-RC	52519.486876	1.2130	55.766	218.721
SUPA00119527.fits	W-C-RC	52519.488937	1.2200	55.323	219.763
SUPA00119537.fits	W-C-RC	52519.490985	1.2270	54.874	220.776
SUPA00119547.fits	W-C-RC	52519.493061	1.2340	54.408	221.775
SUPA00119557.fits	W-C-RC	52519.495136	1.2420	53.934	222.752
SUPA00119567.fits	W-C-RC	52519.497217	1.2490	53.450	223.707
SUPA00119577.fits	W-C-RC	52519.499296	1.2580	52.959	224.638
SUPA00119587.fits	W-C-RC	52519.501380	1.2660	52.457	225.549
SUPA00119597.fits	W-C-RC	52519.503453	1.2750	51.951	226.434
SUPA00119607.fits	W-C-RC	52519.505525	1.2840	51.439	227.296
SUPA00119617.fits	W-C-RC	52519.507603	1.2940	50.915	228.142
SUPA00119627.fits	W-C-RC	52519.509684	1.3040	50.385	228.967
SUPA00119637.fits	W-C-RC	52519.511760	1.3140	49.851	229.770
SUPA00119647.fits	W-C-RC	52519.513842	1.3250	49.308	230.557
SUPA00119657.fits	W-C-RC	52519.515934	1.3370	48.756	231.329
SUPA00119667.fits	W-C-RC	52519.518021	1.3480	48.200	232.080
SUPA00119677.fits	W-C-RC	52519.520101	1.3600	47.640	232.813
SUPA00119687.fits	W-C-RC	52519.522163	1.3730	47.080	233.521
SUPA00119697.fits	W-C-RC	52519.524247	1.3860	46.508	234.220
SUPA00119707.fits	W-C-RC	52519.526333	1.4000	45.931	234.904
SUPA00119717.fits	W-C-RC	52519.528416	1.4140	45.350	235.572
SUPA00119727.fits	W-C-RC	52519.530499	1.4290	44.764	236.224
SUPA00119737.fits	W-C-RC	52519.532578	1.4440	44.175	236.861
SUPA00119747.fits	W-C-RC	52519.534665	1.4600	43.580	237.486
SUPA00119757.fits	W-C-RC	52519.536741	1.4760	42.983	238.093
SUPA00119767.fits	W-C-RC	52519.538811	1.4930	42.385	238.687

La suite, page suivante ...

ANNEXE D. DONNÉES SMBAS

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00119777.fits	W-C-RC	52519.540880	1.5110	41.782	239.268
SUPA00119787.fits	W-C-RC	52519.542930	1.5290	41.182	239.830
SUPA00119797.fits	W-C-RC	52519.544978	1.5480	40.579	240.381
SUPA00119807.fits	W-C-RC	52519.547026	1.5680	39.973	240.920
SUPA00119817.fits	W-C-RC	52519.549075	1.5890	39.363	241.449
SUPA00119827.fits	W-C-RC	52519.551149	1.6100	38.744	241.975
SUPA00119837.fits	W-C-RC	52519.553196	1.6320	38.127	242.482
SUPA00119847.fits	W-C-RC	52519.555244	1.6560	37.510	242.980
SUPA00119857.fits	W-C-RC	52519.557293	1.6800	36.888	243.469
SUPA00119867.fits	W-C-RC	52519.559342	1.7050	36.265	243.949
SUPA00119877.fits	W-C-RC	52519.561390	1.7310	35.639	244.419
SUPA00119887.fits	W-C-RC	52519.563438	1.7580	35.010	244.881
SUPA00119897.fits	W-C-RC	52519.565492	1.7870	34.378	245.336
SUPA00119907.fits	W-C-RC	52519.567539	1.8170	33.745	245.780
SUPA00119917.fits	W-C-RC	52519.569585	1.8480	33.110	246.218
SUPA00119927.fits	W-C-RC	52519.571634	1.8810	32.473	246.648
SUPA00119937.fits	W-C-RC	52519.573681	1.9150	31.833	247.070
SUPA00119947.fits	W-C-RC	52519.575741	1.9510	31.189	247.487
SUPA00119957.fits	W-C-RC	52519.577791	1.9880	30.543	247.897
SUPA00119977.fits	W-C-RC	52519.581904	2.0690	29.246	248.698
SUPA00119987.fits	W-J-B	52519.588455	2.2160	27.164	249.922
SUPA00119997.fits	W-J-B	52519.590502	2.2670	26.511	250.292
SUPA00120007.fits	W-J-B	52519.594000	2.3610	25.391	250.912
SUPA00120017.fits	W-C-RC	52519.600907	2.5760	23.167	252.094
SUPA00120027.fits	W-C-RC	52519.602978	2.6490	22.497	252.437
SUPA00120037.fits	W-C-RC	52519.605050	2.7270	21.826	252.777
SUPA00120057.fits	W-C-RC	52519.609173	2.8990	20.486	253.439
SUPA00120067.fits	W-C-RC	52519.611220	2.9940	19.819	253.761
SUPA00120077.fits	W-C-RC	52519.613267	3.0950	19.151	254.081
SUPA00120087.fits	W-C-RC	52519.615313	3.2040	18.483	254.396
SUPA00120097.fits	W-C-RC	52519.617363	3.3220	17.811	254.707
SUPA00120107.fits	W-C-RC	52519.619411	3.4490	17.139	255.015

Fin de la liste pour C7

TAB. D.9: Liste des images pour le Chip 8.
centré en $\alpha = 22 : 40 : 42.3312$, $\delta = -07 : 44 : 17.7749$

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00118538.fits	W-J-B	52519.266795	2.2280	26.114	109.486
SUPA00118548.fits	W-J-B	52519.268843	2.1790	26.769	109.854
SUPA00118558.fits	W-C-RC	52519.276127	2.0240	29.086	111.206
SUPA00118568.fits	W-C-RC	52519.278175	1.9840	29.731	111.598
SUPA00118578.fits	W-C-RC	52519.280221	1.9470	30.378	111.999
SUPA00118588.fits	W-C-RC	52519.282270	1.9110	31.023	112.406
SUPA00118598.fits	W-C-RC	52519.285021	1.8660	31.884	112.964
SUPA00118608.fits	W-C-RC	52519.287073	1.8340	32.524	113.388
SUPA00118618.fits	W-C-RC	52519.289125	1.8040	33.164	113.819
SUPA00118638.fits	W-C-RC	52519.293218	1.7460	34.430	114.703
SUPA00118648.fits	W-C-RC	52519.295304	1.7190	35.073	115.165
SUPA00118658.fits	W-C-RC	52519.297387	1.6930	35.712	115.636
SUPA00118668.fits	W-C-RC	52519.299434	1.6680	36.338	116.107
SUPA00118678.fits	W-C-RC	52519.301483	1.6450	36.961	116.588
SUPA00118688.fits	W-C-RC	52519.303531	1.6220	37.581	117.077
SUPA00118698.fits	W-C-RC	52519.305580	1.6000	38.199	117.576
SUPA00118708.fits	W-C-RC	52519.307629	1.5790	38.815	118.086
SUPA00118718.fits	W-C-RC	52519.309677	1.5590	39.427	118.606
SUPA00118728.fits	W-C-RC	52519.311726	1.5390	40.036	119.136
SUPA00118738.fits	W-C-RC	52519.313774	1.5210	40.642	119.677
SUPA00118748.fits	W-C-RC	52519.315823	1.5030	41.245	120.229
SUPA00118758.fits	W-C-RC	52519.317871	1.4860	41.844	120.792
SUPA00118768.fits	W-C-RC	52519.319920	1.4690	42.441	121.369
SUPA00118778.fits	W-C-RC	52519.321969	1.4530	43.032	121.957
SUPA00118788.fits	W-C-RC	52519.324017	1.4380	43.621	122.558
SUPA00118808.fits	W-J-B	52519.330708	1.3910	45.514	124.616
SUPA00118818.fits	W-J-B	52519.332755	1.3780	46.084	125.276
SUPA00118828.fits	W-C-RC	52519.338680	1.3430	47.705	127.273
SUPA00118838.fits	W-C-RC	52519.340730	1.3320	48.257	127.996
SUPA00118848.fits	W-C-RC	52519.342779	1.3210	48.803	128.736
SUPA00118858.fits	W-C-RC	52519.344827	1.3100	49.342	129.493
SUPA00118868.fits	W-C-RC	52519.346877	1.3000	49.876	130.267
SUPA00118878.fits	W-C-RC	52519.348924	1.2900	50.404	131.061
SUPA00118888.fits	W-C-RC	52519.350973	1.2810	50.925	131.875
SUPA00118898.fits	W-C-RC	52519.353022	1.2720	51.440	132.707
SUPA00118908.fits	W-C-RC	52519.355071	1.2630	51.948	133.560
SUPA00118918.fits	W-C-RC	52519.357119	1.2550	52.448	134.435
SUPA00118928.fits	W-C-RC	52519.359167	1.2470	52.940	135.329

La suite, page suivante ...

ANNEXE D. DONNÉES SMBAS

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00118938.fits	W-C-RC	52519.361217	1.2390	53.425	136.247
SUPA00118948.fits	W-C-RC	52519.363265	1.2320	53.903	137.184
SUPA00118958.fits	W-C-RC	52519.365313	1.2250	54.372	138.148
SUPA00118968.fits	W-C-RC	52519.367363	1.2180	54.831	139.133
SUPA00118978.fits	W-C-RC	52519.369420	1.2120	55.284	140.147
SUPA00118988.fits	W-C-RC	52519.371471	1.2050	55.725	141.183
SUPA00118998.fits	W-C-RC	52519.373545	1.1990	56.157	142.242
SUPA00119008.fits	W-C-RC	52519.375592	1.1940	56.582	143.338
SUPA00119018.fits	W-C-RC	52519.377640	1.1880	56.992	144.447
SUPA00119028.fits	W-C-RC	52519.379712	1.1830	57.395	145.595
SUPA00119038.fits	W-C-RC	52519.381760	1.1780	57.782	146.755
SUPA00119048.fits	W-C-RC	52519.383809	1.1740	58.158	147.943
SUPA00119058.fits	W-C-RC	52519.385859	1.1690	58.520	149.158
SUPA00119078.fits	W-C-RC	52519.389954	1.1610	59.208	151.660
SUPA00119088.fits	W-C-RC	52519.392003	1.1570	59.531	152.953
SUPA00119098.fits	W-C-RC	52519.394052	1.1540	59.840	154.270
SUPA00119108.fits	W-C-RC	52519.396100	1.1510	60.135	155.610
SUPA00119118.fits	W-C-RC	52519.398149	1.1480	60.415	156.977
SUPA00119128.fits	W-C-RC	52519.400198	1.1450	60.679	158.369
SUPA00119138.fits	W-C-RC	52519.402246	1.1420	60.928	159.782
SUPA00119148.fits	W-C-RC	52519.404295	1.1400	61.160	161.218
SUPA00119158.fits	W-C-RC	52519.406345	1.1370	61.376	162.674
SUPA00119168.fits	W-C-RC	52519.408404	1.1350	61.575	164.162
SUPA00119178.fits	W-C-RC	52519.410452	1.1340	61.756	165.657
SUPA00119188.fits	W-J-B	52519.415906	1.1300	62.151	169.722
SUPA00119198.fits	W-J-B	52519.417952	1.1290	62.266	171.273
SUPA00119208.fits	W-C-RC	52519.423293	1.1270	62.477	175.370
SUPA00119218.fits	W-C-RC	52519.425363	1.1270	62.524	176.969
SUPA00119228.fits	W-C-RC	52519.427410	1.1270	62.551	178.558
SUPA00119238.fits	W-C-RC	52519.429457	1.1270	62.559	180.147
SUPA00119248.fits	W-C-RC	52519.431506	1.1270	62.548	181.736
SUPA00119258.fits	W-C-RC	52519.433554	1.1270	62.517	183.324
SUPA00119268.fits	W-C-RC	52519.435603	1.1280	62.467	184.909
SUPA00119278.fits	W-C-RC	52519.437651	1.1290	62.398	186.484
SUPA00119288.fits	W-C-RC	52519.439700	1.1300	62.310	188.052
SUPA00119298.fits	W-C-RC	52519.441749	1.1310	62.203	189.611
SUPA00119308.fits	W-C-RC	52519.443797	1.1320	62.078	191.153
SUPA00119338.fits	W-C-RC	52519.449943	1.1380	61.593	195.703
SUPA00119348.fits	W-C-RC	52519.451992	1.1400	61.396	197.180
SUPA00119358.fits	W-C-RC	52519.454040	1.1430	61.182	198.642
SUPA00119368.fits	W-C-RC	52519.456089	1.1450	60.951	200.079

La suite, page suivante ...

ANNEXE D. DONNÉES SMBAS

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00119388.fits	W-C-RC	52519.460210	1.1510	60.441	202.889
SUPA00119408.fits	W-C-RC	52519.464340	1.1580	59.862	205.638
SUPA00119418.fits	W-C-RC	52519.466390	1.1620	59.554	206.958
SUPA00119428.fits	W-C-RC	52519.468439	1.1660	59.232	208.251
SUPA00119438.fits	W-C-RC	52519.470488	1.1700	58.896	209.518
SUPA00119448.fits	W-C-RC	52519.472536	1.1750	58.546	210.759
SUPA00119458.fits	W-C-RC	52519.474585	1.1800	58.183	211.974
SUPA00119468.fits	W-C-RC	52519.476633	1.1850	57.809	213.162
SUPA00119478.fits	W-C-RC	52519.478682	1.1900	57.423	214.325
SUPA00119488.fits	W-C-RC	52519.480730	1.1950	57.025	215.464
SUPA00119508.fits	W-C-RC	52519.484827	1.2070	56.196	217.659
SUPA00119518.fits	W-C-RC	52519.486876	1.2130	55.766	218.721
SUPA00119528.fits	W-C-RC	52519.488937	1.2200	55.323	219.763
SUPA00119538.fits	W-C-RC	52519.490985	1.2270	54.874	220.776
SUPA00119548.fits	W-C-RC	52519.493061	1.2340	54.408	221.775
SUPA00119558.fits	W-C-RC	52519.495136	1.2420	53.934	222.752
SUPA00119568.fits	W-C-RC	52519.497217	1.2490	53.450	223.707
SUPA00119578.fits	W-C-RC	52519.499296	1.2580	52.959	224.638
SUPA00119588.fits	W-C-RC	52519.501380	1.2660	52.457	225.549
SUPA00119598.fits	W-C-RC	52519.503453	1.2750	51.951	226.434
SUPA00119608.fits	W-C-RC	52519.505525	1.2840	51.439	227.296
SUPA00119618.fits	W-C-RC	52519.507603	1.2940	50.915	228.142
SUPA00119628.fits	W-C-RC	52519.509684	1.3040	50.385	228.967
SUPA00119638.fits	W-C-RC	52519.511760	1.3140	49.851	229.770
SUPA00119648.fits	W-C-RC	52519.513842	1.3250	49.308	230.557
SUPA00119658.fits	W-C-RC	52519.515934	1.3370	48.756	231.329
SUPA00119668.fits	W-C-RC	52519.518021	1.3480	48.200	232.080
SUPA00119678.fits	W-C-RC	52519.520101	1.3600	47.640	232.813
SUPA00119688.fits	W-C-RC	52519.522163	1.3730	47.080	233.521
SUPA00119698.fits	W-C-RC	52519.524247	1.3860	46.508	234.220
SUPA00119708.fits	W-C-RC	52519.526333	1.4000	45.931	234.904
SUPA00119718.fits	W-C-RC	52519.528416	1.4140	45.350	235.572
SUPA00119728.fits	W-C-RC	52519.530499	1.4290	44.764	236.224
SUPA00119738.fits	W-C-RC	52519.532578	1.4440	44.175	236.861
SUPA00119748.fits	W-C-RC	52519.534665	1.4600	43.580	237.486
SUPA00119758.fits	W-C-RC	52519.536741	1.4760	42.983	238.093
SUPA00119768.fits	W-C-RC	52519.538811	1.4930	42.385	238.687
SUPA00119778.fits	W-C-RC	52519.540880	1.5110	41.782	239.268
SUPA00119788.fits	W-C-RC	52519.542930	1.5290	41.182	239.830
SUPA00119798.fits	W-C-RC	52519.544978	1.5480	40.579	240.381
SUPA00119808.fits	W-C-RC	52519.547026	1.5680	39.973	240.920

La suite, page suivante ...

ANNEXE D. DONNÉES SMBAS

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00119818.fits	W-C-RC	52519.549075	1.5890	39.363	241.449
SUPA00119828.fits	W-C-RC	52519.551149	1.6100	38.744	241.975
SUPA00119838.fits	W-C-RC	52519.553196	1.6320	38.127	242.482
SUPA00119848.fits	W-C-RC	52519.555244	1.6560	37.510	242.980
SUPA00119858.fits	W-C-RC	52519.557293	1.6800	36.888	243.469
SUPA00119868.fits	W-C-RC	52519.559342	1.7050	36.265	243.949
SUPA00119878.fits	W-C-RC	52519.561390	1.7310	35.639	244.419
SUPA00119888.fits	W-C-RC	52519.563438	1.7580	35.010	244.881
SUPA00119898.fits	W-C-RC	52519.565492	1.7870	34.378	245.336
SUPA00119918.fits	W-C-RC	52519.569585	1.8480	33.110	246.218
SUPA00119928.fits	W-C-RC	52519.571634	1.8810	32.473	246.648
SUPA00119938.fits	W-C-RC	52519.573681	1.9150	31.833	247.070
SUPA00119958.fits	W-C-RC	52519.577791	1.9880	30.543	247.897
SUPA00119968.fits	W-C-RC	52519.579843	2.0270	29.898	248.299
SUPA00119978.fits	W-C-RC	52519.581904	2.0690	29.246	248.698
SUPA00119988.fits	W-J-B	52519.588455	2.2160	27.164	249.922
SUPA00119998.fits	W-J-B	52519.590502	2.2670	26.511	250.292
SUPA00120008.fits	W-J-B	52519.594000	2.3610	25.391	250.912
SUPA00120018.fits	W-C-RC	52519.600907	2.5760	23.167	252.094
SUPA00120028.fits	W-C-RC	52519.602978	2.6490	22.497	252.437
SUPA00120038.fits	W-C-RC	52519.605050	2.7270	21.826	252.777
SUPA00120048.fits	W-C-RC	52519.607127	2.8110	21.150	253.113
SUPA00120058.fits	W-C-RC	52519.609173	2.8990	20.486	253.439
SUPA00120068.fits	W-C-RC	52519.611220	2.9940	19.819	253.761
SUPA00120078.fits	W-C-RC	52519.613267	3.0950	19.151	254.081
SUPA00120088.fits	W-C-RC	52519.615313	3.2040	18.483	254.396
SUPA00120098.fits	W-C-RC	52519.617363	3.3220	17.811	254.707
SUPA00120108.fits	W-C-RC	52519.619411	3.4490	17.139	255.015

Fin de la liste pour C8

TAB. D.10: Liste des images pour le Chip 9 ;
centré en $\alpha = 22 : 40 : 41.9304$, $\delta = -07 : 30 : 44.3142$

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00118539.fits	W-J-B	52519.266795	2.2280	26.114	109.486
SUPA00118549.fits	W-J-B	52519.268843	2.1790	26.769	109.854
SUPA00118559.fits	W-C-RC	52519.276127	2.0240	29.086	111.206
SUPA00118569.fits	W-C-RC	52519.278175	1.9840	29.731	111.598
SUPA00118579.fits	W-C-RC	52519.280221	1.9470	30.378	111.999
SUPA00118589.fits	W-C-RC	52519.282270	1.9110	31.023	112.406
SUPA00118599.fits	W-C-RC	52519.285021	1.8660	31.884	112.964
SUPA00118609.fits	W-C-RC	52519.287073	1.8340	32.524	113.388
SUPA00118619.fits	W-C-RC	52519.289125	1.8040	33.164	113.819
SUPA00118629.fits	W-C-RC	52519.291172	1.7740	33.799	114.257
SUPA00118639.fits	W-C-RC	52519.293218	1.7460	34.430	114.703
SUPA00118659.fits	W-C-RC	52519.297387	1.6930	35.712	115.636
SUPA00118669.fits	W-C-RC	52519.299434	1.6680	36.338	116.107
SUPA00118679.fits	W-C-RC	52519.301483	1.6450	36.961	116.588
SUPA00118689.fits	W-C-RC	52519.303531	1.6220	37.581	117.077
SUPA00118699.fits	W-C-RC	52519.305580	1.6000	38.199	117.576
SUPA00118709.fits	W-C-RC	52519.307629	1.5790	38.815	118.086
SUPA00118719.fits	W-C-RC	52519.309677	1.5590	39.427	118.606
SUPA00118729.fits	W-C-RC	52519.311726	1.5390	40.036	119.136
SUPA00118739.fits	W-C-RC	52519.313774	1.5210	40.642	119.677
SUPA00118749.fits	W-C-RC	52519.315823	1.5030	41.245	120.229
SUPA00118759.fits	W-C-RC	52519.317871	1.4860	41.844	120.792
SUPA00118769.fits	W-C-RC	52519.319920	1.4690	42.441	121.369
SUPA00118779.fits	W-C-RC	52519.321969	1.4530	43.032	121.957
SUPA00118789.fits	W-C-RC	52519.324017	1.4380	43.621	122.558
SUPA00118809.fits	W-J-B	52519.330708	1.3910	45.514	124.616
SUPA00118819.fits	W-J-B	52519.332755	1.3780	46.084	125.276
SUPA00118829.fits	W-C-RC	52519.338680	1.3430	47.705	127.273
SUPA00118839.fits	W-C-RC	52519.340730	1.3320	48.257	127.996
SUPA00118849.fits	W-C-RC	52519.342779	1.3210	48.803	128.736
SUPA00118859.fits	W-C-RC	52519.344827	1.3100	49.342	129.493
SUPA00118869.fits	W-C-RC	52519.346877	1.3000	49.876	130.267
SUPA00118879.fits	W-C-RC	52519.348924	1.2900	50.404	131.061
SUPA00118889.fits	W-C-RC	52519.350973	1.2810	50.925	131.875
SUPA00118899.fits	W-C-RC	52519.353022	1.2720	51.440	132.707
SUPA00118909.fits	W-C-RC	52519.355071	1.2630	51.948	133.560
SUPA00118919.fits	W-C-RC	52519.357119	1.2550	52.448	134.435
SUPA00118929.fits	W-C-RC	52519.359167	1.2470	52.940	135.329

La suite, page suivante ...

ANNEXE D. DONNÉES SMBAS

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00118939.fits	W-C-RC	52519.361217	1.2390	53.425	136.247
SUPA00118949.fits	W-C-RC	52519.363265	1.2320	53.903	137.184
SUPA00118959.fits	W-C-RC	52519.365313	1.2250	54.372	138.148
SUPA00118969.fits	W-C-RC	52519.367363	1.2180	54.831	139.133
SUPA00118979.fits	W-C-RC	52519.369420	1.2120	55.284	140.147
SUPA00118989.fits	W-C-RC	52519.371471	1.2050	55.725	141.183
SUPA00118999.fits	W-C-RC	52519.373545	1.1990	56.157	142.242
SUPA00119009.fits	W-C-RC	52519.375592	1.1940	56.582	143.338
SUPA00119019.fits	W-C-RC	52519.377640	1.1880	56.992	144.447
SUPA00119029.fits	W-C-RC	52519.379712	1.1830	57.395	145.595
SUPA00119039.fits	W-C-RC	52519.381760	1.1780	57.782	146.755
SUPA00119049.fits	W-C-RC	52519.383809	1.1740	58.158	147.943
SUPA00119059.fits	W-C-RC	52519.385859	1.1690	58.520	149.158
SUPA00119069.fits	W-C-RC	52519.387906	1.1650	58.871	150.396
SUPA00119079.fits	W-C-RC	52519.389954	1.1610	59.208	151.660
SUPA00119089.fits	W-C-RC	52519.392003	1.1570	59.531	152.953
SUPA00119099.fits	W-C-RC	52519.394052	1.1540	59.840	154.270
SUPA00119109.fits	W-C-RC	52519.396100	1.1510	60.135	155.610
SUPA00119119.fits	W-C-RC	52519.398149	1.1480	60.415	156.977
SUPA00119129.fits	W-C-RC	52519.400198	1.1450	60.679	158.369
SUPA00119139.fits	W-C-RC	52519.402246	1.1420	60.928	159.782
SUPA00119149.fits	W-C-RC	52519.404295	1.1400	61.160	161.218
SUPA00119159.fits	W-C-RC	52519.406345	1.1370	61.376	162.674
SUPA00119169.fits	W-C-RC	52519.408404	1.1350	61.575	164.162
SUPA00119179.fits	W-C-RC	52519.410452	1.1340	61.756	165.657
SUPA00119189.fits	W-J-B	52519.415906	1.1300	62.151	169.722
SUPA00119199.fits	W-J-B	52519.417952	1.1290	62.266	171.273
SUPA00119209.fits	W-C-RC	52519.423293	1.1270	62.477	175.370
SUPA00119219.fits	W-C-RC	52519.425363	1.1270	62.524	176.969
SUPA00119229.fits	W-C-RC	52519.427410	1.1270	62.551	178.558
SUPA00119239.fits	W-C-RC	52519.429457	1.1270	62.559	180.147
SUPA00119249.fits	W-C-RC	52519.431506	1.1270	62.548	181.736
SUPA00119259.fits	W-C-RC	52519.433554	1.1270	62.517	183.324
SUPA00119269.fits	W-C-RC	52519.435603	1.1280	62.467	184.909
SUPA00119279.fits	W-C-RC	52519.437651	1.1290	62.398	186.484
SUPA00119289.fits	W-C-RC	52519.439700	1.1300	62.310	188.052
SUPA00119299.fits	W-C-RC	52519.441749	1.1310	62.203	189.611
SUPA00119309.fits	W-C-RC	52519.443797	1.1320	62.078	191.153
SUPA00119319.fits	W-C-RC	52519.445847	1.1340	61.934	192.689
SUPA00119329.fits	W-C-RC	52519.447894	1.1360	61.772	194.205
SUPA00119339.fits	W-C-RC	52519.449943	1.1380	61.593	195.703

La suite, page suivante ...

ANNEXE D. DONNÉES SMBAS

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00119349.fits	W-C-RC	52519.451992	1.1400	61.396	197.180
SUPA00119359.fits	W-C-RC	52519.454040	1.1430	61.182	198.642
SUPA00119369.fits	W-C-RC	52519.456089	1.1450	60.951	200.079
SUPA00119379.fits	W-C-RC	52519.458137	1.1480	60.705	201.496
SUPA00119389.fits	W-C-RC	52519.460210	1.1510	60.441	202.889
SUPA00119399.fits	W-C-RC	52519.462279	1.1550	60.158	204.287
SUPA00119409.fits	W-C-RC	52519.464340	1.1580	59.862	205.638
SUPA00119419.fits	W-C-RC	52519.466390	1.1620	59.554	206.958
SUPA00119429.fits	W-C-RC	52519.468439	1.1660	59.232	208.251
SUPA00119439.fits	W-C-RC	52519.470488	1.1700	58.896	209.518
SUPA00119449.fits	W-C-RC	52519.472536	1.1750	58.546	210.759
SUPA00119459.fits	W-C-RC	52519.474585	1.1800	58.183	211.974
SUPA00119469.fits	W-C-RC	52519.476633	1.1850	57.809	213.162
SUPA00119479.fits	W-C-RC	52519.478682	1.1900	57.423	214.325
SUPA00119489.fits	W-C-RC	52519.480730	1.1950	57.025	215.464
SUPA00119499.fits	W-C-RC	52519.482779	1.2010	56.616	216.574
SUPA00119509.fits	W-C-RC	52519.484827	1.2070	56.196	217.659
SUPA00119519.fits	W-C-RC	52519.486876	1.2130	55.766	218.721
SUPA00119529.fits	W-C-RC	52519.488937	1.2200	55.323	219.763
SUPA00119539.fits	W-C-RC	52519.490985	1.2270	54.874	220.776
SUPA00119549.fits	W-C-RC	52519.493061	1.2340	54.408	221.775
SUPA00119559.fits	W-C-RC	52519.495136	1.2420	53.934	222.752
SUPA00119569.fits	W-C-RC	52519.497217	1.2490	53.450	223.707
SUPA00119579.fits	W-C-RC	52519.499296	1.2580	52.959	224.638
SUPA00119589.fits	W-C-RC	52519.501380	1.2660	52.457	225.549
SUPA00119599.fits	W-C-RC	52519.503453	1.2750	51.951	226.434
SUPA00119609.fits	W-C-RC	52519.505525	1.2840	51.439	227.296
SUPA00119619.fits	W-C-RC	52519.507603	1.2940	50.915	228.142
SUPA00119629.fits	W-C-RC	52519.509684	1.3040	50.385	228.967
SUPA00119639.fits	W-C-RC	52519.511760	1.3140	49.851	229.770
SUPA00119649.fits	W-C-RC	52519.513842	1.3250	49.308	230.557
SUPA00119659.fits	W-C-RC	52519.515934	1.3370	48.756	231.329
SUPA00119669.fits	W-C-RC	52519.518021	1.3480	48.200	232.080
SUPA00119679.fits	W-C-RC	52519.520101	1.3600	47.640	232.813
SUPA00119689.fits	W-C-RC	52519.522163	1.3730	47.080	233.521
SUPA00119699.fits	W-C-RC	52519.524247	1.3860	46.508	234.220
SUPA00119709.fits	W-C-RC	52519.526333	1.4000	45.931	234.904
SUPA00119719.fits	W-C-RC	52519.528416	1.4140	45.350	235.572
SUPA00119729.fits	W-C-RC	52519.530499	1.4290	44.764	236.224
SUPA00119739.fits	W-C-RC	52519.532578	1.4440	44.175	236.861
SUPA00119749.fits	W-C-RC	52519.534665	1.4600	43.580	237.486

La suite, page suivante ...

ANNEXE D. DONNÉES SMBAS

Fichier	Filtre	MJD-STR	Airmass	Altitude.	Azimuth
SUPA00119759.fits	W-C-RC	52519.536741	1.4760	42.983	238.093
SUPA00119769.fits	W-C-RC	52519.538811	1.4930	42.385	238.687
SUPA00119779.fits	W-C-RC	52519.540880	1.5110	41.782	239.268
SUPA00119789.fits	W-C-RC	52519.542930	1.5290	41.182	239.830
SUPA00119799.fits	W-C-RC	52519.544978	1.5480	40.579	240.381
SUPA00119809.fits	W-C-RC	52519.547026	1.5680	39.973	240.920
SUPA00119819.fits	W-C-RC	52519.549075	1.5890	39.363	241.449
SUPA00119829.fits	W-C-RC	52519.551149	1.6100	38.744	241.975
SUPA00119839.fits	W-C-RC	52519.553196	1.6320	38.127	242.482
SUPA00119849.fits	W-C-RC	52519.555244	1.6560	37.510	242.980
SUPA00119859.fits	W-C-RC	52519.557293	1.6800	36.888	243.469
SUPA00119869.fits	W-C-RC	52519.559342	1.7050	36.265	243.949
SUPA00119879.fits	W-C-RC	52519.561390	1.7310	35.639	244.419
SUPA00119889.fits	W-C-RC	52519.563438	1.7580	35.010	244.881
SUPA00119899.fits	W-C-RC	52519.565492	1.7870	34.378	245.336
SUPA00119909.fits	W-C-RC	52519.567539	1.8170	33.745	245.780
SUPA00119919.fits	W-C-RC	52519.569585	1.8480	33.110	246.218
SUPA00119929.fits	W-C-RC	52519.571634	1.8810	32.473	246.648
SUPA00119939.fits	W-C-RC	52519.573681	1.9150	31.833	247.070
SUPA00119949.fits	W-C-RC	52519.575741	1.9510	31.189	247.487
SUPA00119959.fits	W-C-RC	52519.577791	1.9880	30.543	247.897
SUPA00119969.fits	W-C-RC	52519.579843	2.0270	29.898	248.299
SUPA00119979.fits	W-C-RC	52519.581904	2.0690	29.246	248.698
SUPA00119989.fits	W-J-B	52519.588455	2.2160	27.164	249.922
SUPA00119999.fits	W-J-B	52519.590502	2.2670	26.511	250.292
SUPA00120009.fits	W-J-B	52519.594000	2.3610	25.391	250.912
SUPA00120019.fits	W-C-RC	52519.600907	2.5760	23.167	252.094
SUPA00120029.fits	W-C-RC	52519.602978	2.6490	22.497	252.437
SUPA00120039.fits	W-C-RC	52519.605050	2.7270	21.826	252.777
SUPA00120049.fits	W-C-RC	52519.607127	2.8110	21.150	253.113
SUPA00120059.fits	W-C-RC	52519.609173	2.8990	20.486	253.439
SUPA00120069.fits	W-C-RC	52519.611220	2.9940	19.819	253.761
SUPA00120079.fits	W-C-RC	52519.613267	3.0950	19.151	254.081
SUPA00120089.fits	W-C-RC	52519.615313	3.2040	18.483	254.396
SUPA00120099.fits	W-C-RC	52519.617363	3.3220	17.811	254.707
SUPA00120109.fits	W-C-RC	52519.619411	3.4490	17.139	255.015

Fin de la liste pour C9

D.2 Convolution

D.2.1 Définition mathématique

Toutes les définitions données ici, sont en dimension 2. Les notations mathématiques usuelles sont adoptées, à savoir : $\mathcal{L}(\mathcal{E}, \mathcal{F})$ l'ensemble des applications linéaires de E dans F ; $\mathcal{L}^1(\mathbb{E})$ l'ensemble des applications intégrables sur E à valeurs dans \mathbb{C} ; l^1 l'ensemble des séries sommables sur \mathbb{Z}^2 .

Définition D.2.1. : Convolution sur un espace continu Soit $f, g \in \mathcal{L}^1(\mathbb{R}^2)$. Le produit de convolution entre f et g , noté $f * g$, est défini par :

$$\forall (x, y) \in \mathbb{R}^2, (f * g)(x, y) = \int \int_{\mathbb{R}^2} f(u, v) \cdot g(x - u, y - v) du dv \quad (\text{D.1})$$

Définition D.2.2. : Convolution sur un espace discret Soit $f, g \in l^1$. Le produit de convolution entre f et g , noté $f * g$, est défini par :

$$\forall (x, y) \in \mathbb{Z}^2, (f * g)(x, y) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{j=-\infty}^{+\infty} f(i, j) \cdot g(x - i, y - j) \quad (\text{D.2})$$

D.2.2 Application

En astronomie, la notion mathématique de *convolution* est associée à celle de *filtres* ou de *masques*. Cette technique permet en plus de pallier les imperfections des instruments, de mettre en valeur et de révéler au mieux les détails les plus fins dans nos images.

Soit l'image \mathbf{I}_1 .fits (notée \mathbf{I}_1) de dimension (X, Y).

Soit la fonction $f : ([0, X - 1] \times [0, Y - 1]) \cap \mathbb{Z}^2 \longrightarrow \mathbb{R}$,

$(x, y) \longrightarrow f(x, y)$: donne pour chaque pixel (x, y) la valeur de ce dernier.

Depuis l'avènement des missions spatiales et afin de corriger et de compenser les imperfections des moyens d'acquisition ou conséquences de mauvaises transmissions d'informations les techniques numériques de traitement d'images se sont développées en astronomie. Même si les théories mathématiques sont présentes dans la littérature depuis un certain nombre de décennies, leur application au traitement d'image en astronomie, radiologie ... ne date que d'une vingtaine d'années. En astronomie, nous devons une bonne partie de ces développements à la myopie du HST (Hubble Space Telescope) ou devrais-je dire son aberration optique [Starck and Murtagh, 2006].

L'image \mathbf{I}_1 est convoluée par l'image \mathbf{I}_2 .fits (notée \mathbf{I}_2) de dimension $m \times n$. m et n sont des entiers impairs.

La fonction $g : ([0, m - 1] \times [0, n - 1]) \cap \mathbb{Z}^2 \longrightarrow \mathbb{R}$,

$(x, y) \longrightarrow g(x, y)$: donne pour chaque pixel (x, y) la valeur de ce dernier pour \mathbf{I}_2 .

$g(\frac{m-1}{2}, \frac{n-1}{2}) = 1$, correspond à la valeur maximale de la gaussienne centrée en $(\frac{m-1}{2}, \frac{n-1}{2})$.

La convolution par une gaussienne est ce que l'on appelle un *filtre passe bas*, car il réduit le bruit en hautes fréquences. La convolution n'est qu'une méthode parmi tant d'autres (FFT,

ondelettes,...). Il n'existe pas de méthode universelle pour le traitement d'image, il faut donc procéder au cas par cas.

Avant d'écrire la fonction h j'aimerais définir certaines notations pour faciliter la lecture : Je définis deux partitions du domaine de définition D de f , je les note D_1 et D_2 . $D_1 = \{(x,y) \in \mathbb{Z}^2 / \frac{m-1}{2} \leq x \leq X-1 - \frac{m-1}{2} \text{ et } \frac{n-1}{2} \leq y \leq Y-1 - \frac{n-1}{2}\}$, D_2 le complémentaire de D_1 dans D .

Le résultat de la convolution des deux images sera une image I_{fits} de dimension (X,Y) . La fonction $h : D \rightarrow \mathbb{R}$,

$(x,y) \rightarrow h(x,y)$: donne pour chaque pixel (x,y) la valeur de ce dernier pour I .

La fonction h est définie comme suit :

$$\forall (x,y) \in D_1, (g * f)(x,y) = \sum_{i=-(m-1)/2}^{(m-1)/2} \sum_{j=-(n-1)/2}^{(n-1)/2} g(i + \frac{m-1}{2}, j + \frac{n-1}{2}) f(x+i, y+j), \quad (D.3a)$$

$$\forall (x,y) \in D_2, h(x,y) = g(x,y), \quad (D.3b)$$

Une autre façon de faire serait de prolonger par continuité f aux bords, de manière à pouvoir appliquer la produit sur tout le domaine D .

D.3 Détermination de la vitesse angulaire des astéroïdes

Ici, je supposerai que la Terre ainsi que les astéroïdes ont des orbites circulaires, coplanaires (observations proches de l'écliptique). Dans tout ce qui suit, j'utiliserai les indices A pour l'astéroïde et T pour la Terre.

J'écris les moyens mouvements respectifs :

$$n_A = \sqrt{\frac{\mu}{a_A^3}}, \quad (D.4)$$

$$n_T = \sqrt{\frac{\mu}{a_T^3}}, \quad (D.5)$$

avec $\mu = GM_{\odot}$, et a_A , a_T les demi-grands axes respectifs pour l'orbite de l'astéroïde et de la Terre.

La vitesse relative de l'astéroïde par rapport à la Terre est donnée par :

$$V = V_T - V_A, \quad (D.6)$$

où V_T , V_A sont respectivement les vitesses orbitales de la Terre et de l'astéroïde.

L'équation D.6, s'écrit aussi :

$$V = n_{TA}T - n_{NA}A, \quad (D.7)$$

En remplaçant les moyens mouvements par leurs expressions données par les équations D.4 et D.5 et avec $a_T=1$ au, l'équation D.7 s'écrit :

$$V = V_T \left(1 - \sqrt{\frac{1}{a_A}}\right), \quad (\text{D.8})$$

La vitesse angulaire de la Terre (orbite circulaire, $a_T = 1$ au, période orbitale de 365.25 jours) : $V_T=59'.14$ /jour.

La vitesse angulaire (relative, observée depuis la Terre) pour l'astéroïde est donnée par :

$$\omega = \frac{59.14 \left(1 - \sqrt{\frac{1}{a_A}}\right)}{a_A - 1} \quad (\text{D.9})$$

Pour les astéroïdes de la ceinture principale : $11,64 \leq \omega \leq 15,48$.

D.4 Parallélisation du programme

Si je prends le temps ici de présenter cette méthode de parallélisation, c'est que le programme fortran de détection en lui-même n'est pas parallélisable. Devant l'exécuter près de 1400 fois, je paralléliserai son exécution. Les méthodes de parallélisation classiques (OpenMP, MPI) ne sont pas valides ici. Avec l'aide de notre informaticien Teddy Carlucci, je suis donc arrivée à paralléliser l'exécution du code en **bash**. En suivant la méthode présentée dans [Dublé, 2012], il faudra créer le *script* Fig. D.1.

```
#!/bin/sh

NB_CPU=$(cat /proc/cpuinfo |grep processor|wc -l)
NB_CPU=10
# pid du process courant
PID=$$
FICHIER_THREAD="/home/souami/PhD/ACM_SUBARU/N1_FIELDA/R_band/INPUT_Files/tmp/thread_
$PID"
touch $FICHIER_THREAD

ma_fonction()
{
    cd $i
    for j in $(ls IN.asteroide1.C*)
    do
        echo $j
        time asteroide.exe $j 0 > output.o
    done
    touch $FICHIER_THREAD
}

##### main
for i in $(ls -d N1R_1*)
do
    echo "i=$i"
    # nb de cpu utilisés pas le script parallele
    NB_THREADS=$(jobs|wc -l)
    #echo $NB_THREADS
    if [ $NB_THREADS -lt $NB_CPU ] ; then
        ma_fonction "$i" &
    else
        inotifywait $FICHIER_THREAD -o /dev/null 2>/dev/null
        ma_fonction "$i" &
    fi
done
wait
```

FIG. D.1: Script de parallélisation en THREAD sous bash

Au début du script, on définit le nombre de cœurs à utiliser (par exemple ici `NB_CPU=10`) ou on utilise tous ceux qui sont disponibles sur la machine à l'aide de la commande suivante : `"NB_CPU=$(cat /proc/cpuinfo |grep processor|wc -l)`.

Par exemple, ici je veux exécuter le programme *asteroide.exe* dans tous les dossiers `N1R_*`, c'est ce que je défini à travers la partie appelée "main" : où je demande d'exécuter dans la fonction "ma_fonction" dans tous les `N1R_*`. Si le nombre de jobs qui tournent `NB_THREADS` : est inférieur à `NB_CPU` alors on lance la fonction, sinon on attend qu'un cœur se libère, d'ou la commande *inotifywait*.

La fonction définie ici est très simple, elle consiste en l'exécution d'un programme dans tout dossier $i \in N1R_*$. En l'occurrence ici le fichier $j \in IN.asteroide1.C*$ qui contient les paramètres d'entrée est nécessaire pour l'exécution du programme.

Ceci est un modèle simple de fonction. Il me semblait important de partager cette méthode de

parallélisation qui m'a par la suite été très utile non seulement dans le traitement des données SUBARU mais aussi dans le traitement de résultats d'intégrations numériques (Chapitre 4).

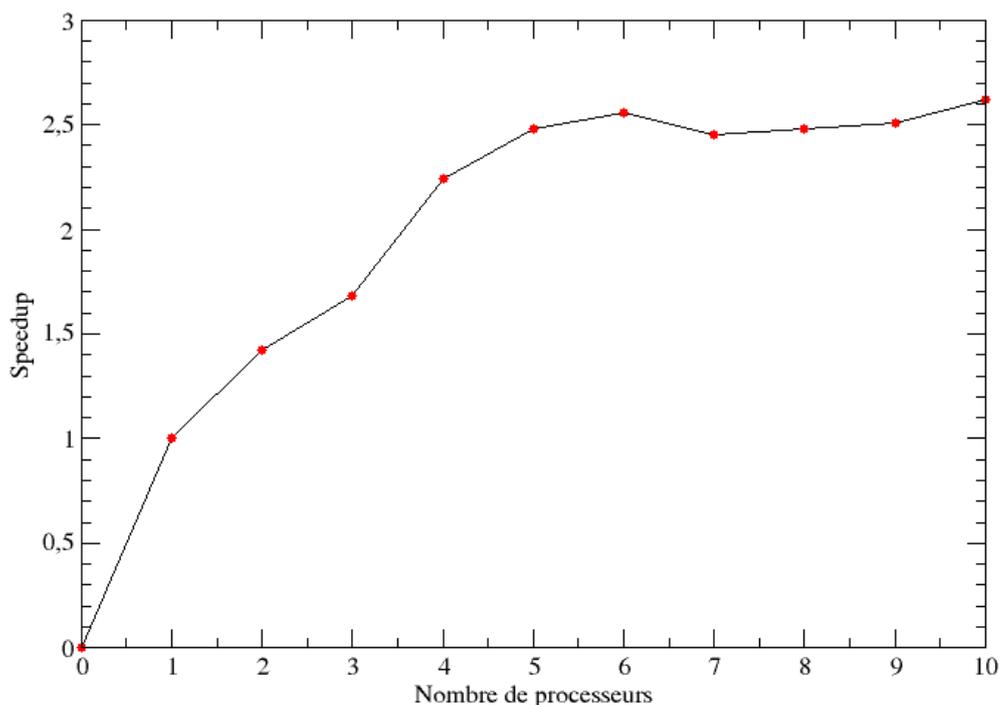


FIG. D.2: Parallélisation en THREAD : gain de performance

Je présente Fig. D.2, le gain de performance en temps CPU en fonction du nombre de cœurs (processeurs) utilisés, ceci est exprimé par la loi d'*Amdahl* que je n'exprimerai pas ici. Nous pouvons constater un gain important en performance et par conséquent en temps de calcul en augmentant le nombre de processeurs.

A noter que c'est le symbole "&" dans le programme principal qui permet l'exécution de plusieurs tâches, et par conséquent des tâches en parallèle.

D.5 Article sur les méthodes de détections

Near-ecliptic Small Main Belt Asteroid Survey (SMBAS): asteroid detection, taxonomic and population classification, light curves.

Damya Souami^{*,1,2}, Fumi Yoshida^{**3}, Jay Anderson⁴, T. Nakamura⁵, B.
Dermawan⁶, Masafumi Yagi³ and Jean Souchay²

¹ *Université Pierre & Marie Curie, 75252 Paris cedex 5, France*
(*damya.souami@obspm.fr),

² *SYRTE, Observatoire de Paris, CNRS UMR 8630, UPMC, 61 avenue de
l'Observatoire, 75014 Paris, France,*

³ *National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588*
(**fumi.yoshida@nao.ac.jp),

⁴ *Space Telescope Science Institute, 3700 San Martin Drive, Baltimore, MD 21218, USA,*

⁵ *Teikyo-Heisei University, 2-51-4 Higashi-Ikebukuro, Toshima, Tokyo 170-8445,*

⁶ *Bandung Institute of Technology, Jalan Ganesha 10, Bandung 40132, Indonesia.*

Abstract

In [9], T.Nakamura suggested to use the SUBARU-class telescopes in the detection of faint asteroids. This has been a particularly fruitful suggestion for statistical survey observations of sub-km main belt asteroids. In fact, within this framework a series of SMBAS (Sub-km Main Belt Asteroid Survey), have been performed, since 2001, [16],[17],[18],[19],[20] with the 8.2m Subaru telescope and the wide field CCD camera; Suprime-Cam, for the systematic investigations of the sub-km Main Belt Asteroids. Within the same framework, we analyze the data collected from the observations of the deep ecliptic field over two nights (2002-09-02 and 2002-09-03), with the R- and the B-bands.

Two methods were used for the detection of objects: eye-detection [16], as well as our new numerical method for asteroid detection, developed by one of us (J.A.). The aim of this paper is to describe this latest method and compare it to the eye-method detection [16]. This study is also the opportunity to describe the limits of this new numerical method which despite of its limitations should not be rejected.

We will be comparing the two methods by confronting their respective

results on asteroid detection for the first night of the SMBAS-III survey. We will also be using the new GBOT-pipeline [3] for establishing light curves.

Keywords: Asteroids; Detection survey; taxonomic classification, light curves, SUBARU telescope, methods of detection.

1. Introduction

T. Nakamura [9] investigated the potential of SUBARU-class telescopes in the study (detection, size distribution and taxonomic classification) of faint sub-km asteroids. Since February 2001 [16], the 8.2m SUBARU-telescope along with its Suprime-Cam wide field camera (with a field of view of $34' \times 27'$) [8] has been used to perform a series of observational surveys targeting Main-Belt Asteroids [17], [18], [20], [5], as well as Jovian Trojans [19][10][21]. About a 100 MBAs can be observed in a single field of view of the Suprime-Cam according to the estimations performed using previous SMBAS surveys: SMBAS-I (February 22 and 25, 2001 (UT)) and SMBAS-II (October 21, 2001 (UT)).

Here we analyze a third survey SMBAS-III, with observations performed in September 02 and 03, 2002 in both R and B bands. As the purpose of this paper is mainly to compare two methods for the detection of moving objects, we will only be focusing on the first night.

For each detected moving object, we measure its velocity and its brightness. For the objects identified in both R- and B-bands, we investigate their taxonomical classification, by computing B-R for each one of them. If the B-R is less than 1.1, the asteroid is either D-type or S-type; if the B-R is larger than 1.1, it is C-type or M-type[20]; this classification will be useful for future estimates of the size of the asteroids.

By assuming that all moving objects are on circular orbits: $e=0$, we will compute approximative values for the semi-major axis (a) and the inclination (I) [4],[11]. This work is based on data collected at Subaru Telescope and obtained from the SMOKA, which is operated by the Astronomy Data Center, National Astronomical Observatory of Japan [1].

2. Observational data

The observations were performed over two consecutive nights, September 02 and 03, 2002; using the 8.2m SUBARU telescope (19d 49m 43s N, 155d

28m 50s W, 4139 m) at Mauna Kea in Hawaii, with its Suprime-Cam [8]. The 80-mega pixel (10240×8192) mosaic camera, covers of a wide field of $34' \times 27'$ and is composed of ten $2k \times 4k$ CCD chips, with a resolution of $0''.202/pixel$.

Two different fields were observed during these two nights, the observations were performed near the ecliptic plane and near opposition, for the first night (2002- 09-02). The first field (FIELDA) is centered at (Ra=22:41:38.179, DEC=-07:37:35.32) with a total exposure time of 08:29:45.675. For the second night (2002-09-03) the field (FIELDB) chosen at the east side of FIELDA to avoid double object counting thus all detected objects are unique,. It is centered around (Ra=22:41:30.211, DEC=-09:17:52.73) with a total exposure time of 8:16:19.695.

Both FIELDA and FIELDB were surveyed with the R- and B- bands, the data collected during the second night is not entirely exploitable because of bad weather conditions and an artificial satellite passing by our field of view. As the purpose of this paper is to compare two methods of detection in order to assess and evaluate the limits of the new numerical data, only FIELDA will be treated here. The exposure time was set at 120 seconds as was the case in previous surveys [20], this constraint results from the fact that outer edge MBAs (around 3.5 AU) move with a velocity of 0.46arcsec/minute, and have an estimate of the average seeing at Mauna Kea around 0.9 arc. A longer exposure time would result in the observation of non-pontlike objects, which will be hard to identify and measure.

Filter	Start Obs. time	End Obs. time	Airmass at Start	Airmass at End
B	06:24:11.342	20:29:08.011	2.228	2.179
R	06:37:37.639	07:48:35.000	2.024	1.438
B	07:56:13.436	08:01:10.017	1.391	1.378
R	08:07:42.159	09:53:03.000	1.343	1.134
B	09:58:54.506	10:03:51.014	1.130	1.129
R	10:09:32.756	13:59:56.005	1.127	2.069
B	14:07:22.773	14:17:21.015	2.216	2.361
R	14:25:18.557	14:53:57.017	2.576	3.449

Table 1: For FIELDA centered at (22:41:38.179,-07:37:35.32), and for each series of B- and R-band images: start and end observational time, and corresponding airmass.

We took images of each field continuously with R-band, but we also took B-band images several times per night for taxonomic classification. Table 1, summarizes for FieldA and for each series of B- and R-band exposures: the start and end time of observation (UT) as well as its corresponding airmass.

2.1. Data reduction, object detection and astrometric calibration

2.1.1. Eye-detection method

Data reduction was performed using the SDFRED1 software [15], [13] provided by SMOKA (Subaru-Mitaka-Okayama-Kiso-Archive) and also using standard IRAF procedures as it was done in [17],[20]. First, chip by chip, we generate master flat and bias images; which are averages of all the flat and bias images, respectively, and process all the data with the flats and finally in order to correct the two-dimensional bias pattern of each, CCD the master bias image (average of all bias images) was subtracted from each CCD image.

Once the images were reduced we proceeded to the detection by using a method that was first introduced by [16] as well as [7] independently. This technique has also been used since for detecting asteroids within the SMBAS framework, it is described in [17] and [20].



Figure 1: An R-B-R combined image showing a moving object(a $12''.12 \times 20''.20$ -field)

The technique consists of creating a combined image, for detecting objects in the R-band 5 images were used, let us denote the image x in the R-band by R_x . The combined R image was obtained by the following $R_1-R_2+R_3-R_4+R_5$, thus for each moving object we end up with three bright and two dark dots that mark the position of the object.

In the B-band, we used a combination of R- and B-bands to detect the objects as the observations in the B-band were not continuous in time. Thus we used two R-images, one R_{-B} taken just before the B image and one after R_{+B} and obtained a combined image $c_1 R_{-B} - B + c_2 R_{+B}$; c_1 and c_2 being two coefficient required to adjust the sky level of each image. The position of the objects (2 bright spots and one dark, see Fig.1) in pixel are then reported.

This method has allowed the detection of asteroids. Figure 2 shows a reconstitution of the trails obtained by the proper motion of the detection objects over the entire integration time of the observation.

2.1.2. Fortran program detection method

The routine begins by bias-subtracting and flat-fielding each exposure as was done above. It then goes through each exposure, pixel by pixel, and identifies the reasonably bright, unsaturated stars. A position and flux are measured for each star in each exposure, and these positions are used to relate the coordinate system from each exposure to that of the first exposure. We also construct a PSF (point-spread function) model for each exposure based on the 2-D profiles of the observed stars.

To identify the potential asteroids, we take each exposure and subtract the known stars using the PSF model and the average flux determined above. We also subtract a smooth model of the background. Then we convolve the exposure with expected size of an asteroid (3x5 pixels), in order to highlight detections that have the anticipated shape. We make a list of detections that are a minimum distance from known stars and are more significant than a particular threshold. (here, the value of saturation is 28000 DN, value extracted by going through a few images).

The observed trails described by the moving object are measured and the positions of the moving object in pixels are reported.

We then measure the observed trails, this task is far from being easy, just because we see the trails does not mean the computer is able to identify them. This task is realized through a statistical analysis of the residual stack image (stack image realized at the previous stage). We are now able to measure the trails, and measure the velocities in pixels/s in both x and y directions.

In the next paragraphs we will be describing the application of this method to the detection of asteroids in FIELDA.

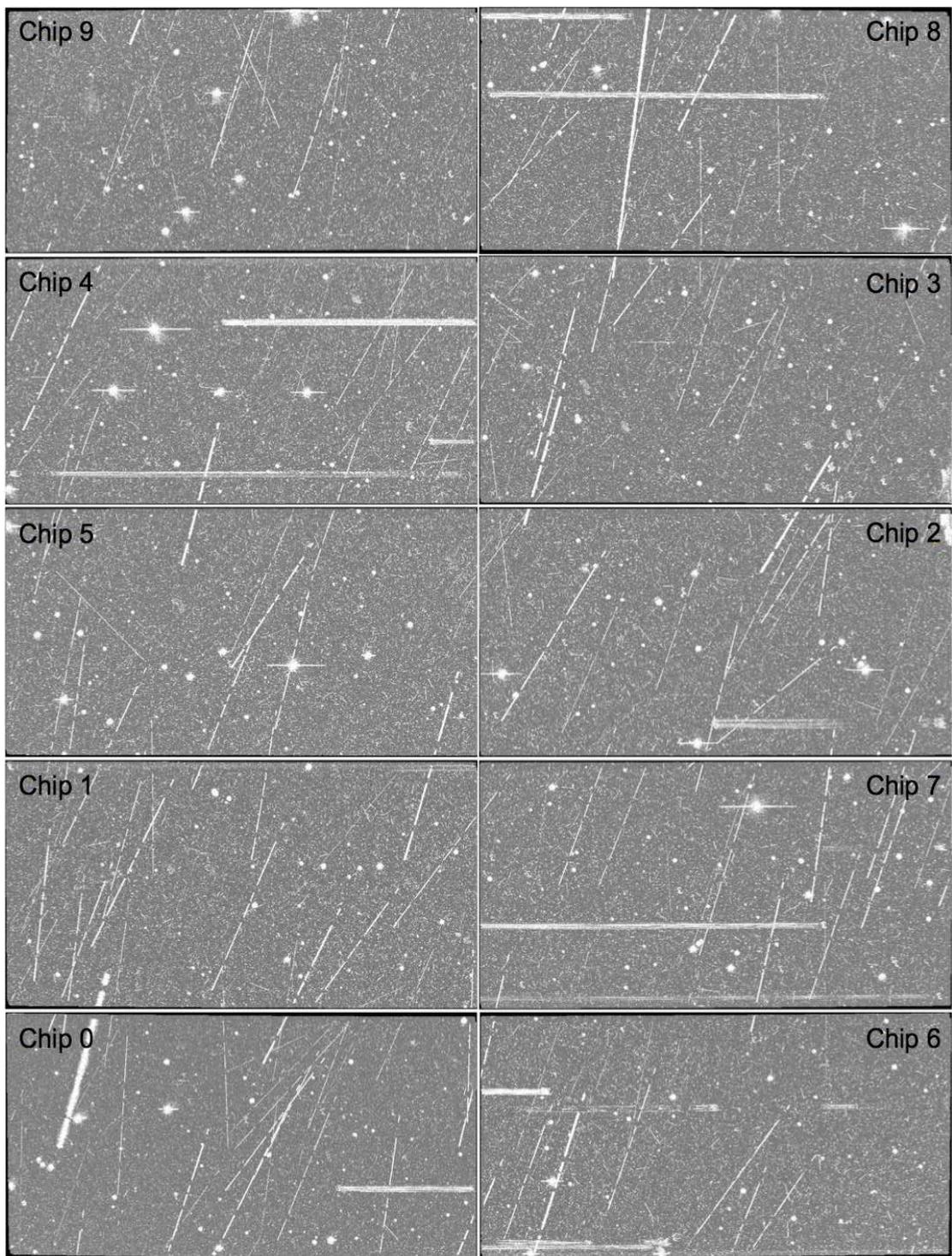


Figure 2: Reconstitution of the trails observed with the eye detection method over the entire mosaic (stacked images).

2.1.3. Application to FIELDA

Here again, we proceed chip by chip. We have applied both methods to detecting objects in FIELDA. The eye detection method has lead to identifying 184 asteroids.

Here we describe the application of the second method. An other important variable to take into account is the number of exposure images to realize the stack image. Indeed, contrary to the first method (Sect.2.1.1) where we were retrieving single positions, here we measure trails thus more images should be used in the stack. There's no mathematical law giving the number of these images, thus we have performed many tests which have lead to a number between 35 and 55 images for these two nights. Though, because of the important variations in the airmass a number of 35 images seemed to be the most optimal.

In order to have the complete mosaic of the entire exposure time, we create a *dynamical bandwidth window* of a length of 35 images over the entire night. Thus for n_{tot} images, we had n_{stack} images. The stack image $Stack_x$ ($x \leq n_{stack}$) is the stack from the images x to $x + 35 - 1$ thus $n_{stack} \leq n_{tot} - 35 + 1$ [12].

Fig 3 shows the totality of all the detections measured for chip 0 (the one at the bottom left of figure 2), over 70 min of total integration time. The detections that lie along a line are likely asteroids; the ones that are just random are probably due to cosmic rays or image defects.

When comparing the trails obtained in chip 0 with the automated method (over 70 min integration time) to the one in the stack image obtained by the eye detection method (over the entire integration time), we notice that some asteroids are only detected with the eye-detection method. For instance, the brightest asteroid observed in Chip 0 (left bottom chip of Fig. 2), and which is the asteroid (5063) Monteverdi is not detected by the automated method, this is due to the choice of our kernel.

Table 2 shows, for the first night, the number of detected objects per chip, for both methods. The number of detected moving objets is not equal to the total of the asteroids detected in the 10 chips as some asteroids can cross two chips over the night (Fig. 2).

We detect 84 objects with the numerical method, which seems to be less efficient than the eye-detection method, though it should not be rejected as one should explore in the future better masks for bad pixels and maybe another way of identifying the moving objects than a convolution as the use

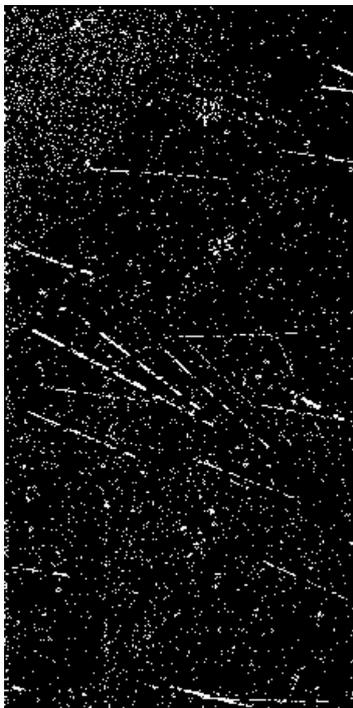


Figure 3: Example of a stack image (70 min total integration time) obtained with the automated method.

of another kernel of smaller dimension will also increase the noise.

The possibility of identifying asteroids in an automated way is potentially powerful and will allow blind reduction of large archival data sets, but it is clear that more work will be necessary to improve the efficiency of detection.

N1	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
eye-detection	29	32	23	26	26	23	18	24	21	22
Numerical method	18	17	12	10	17	0	10	0	0	0

Table 2: Number of detected asteroids per chip, for each method.

2.1.4. Astrometric calibration

Once the objects identified and their positions in pixel measured, we proceed to the astrometric calibration thus using the GAIA-GBOT (Ground

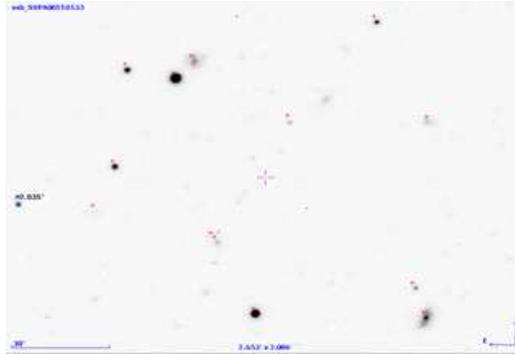
Based Optical Tracking) PIPELINE [3] with the use of the PPMXL star catalog [14]. This pipeline, is destined for the optical tracking of the GAIA mission to allow this latest to fully attain its goal in terms of astrometric precision. The expected astrometric accuracy is of 20 *mas* with respect to the stars in the background field, which corresponds to 150 m for the position on the orbit of GAIA. The astrometric calibration is done by:

- going through all the exposure images, one by one, and detecting the sources brighter than a defined threshold.
- Once the sources identified, it extracts the positions of the centroids in pixels, as well as the corresponding fluxes, ...
- downloading, from the PPMXL astrometric catalog, the stars corresponding to the field of view of the observation, this information is retrieved through the header of the fits files.
- It then connects the sources found in the field to those given by the catalogue, and therefore redetermines the scale and the parameters of transformation matrices.

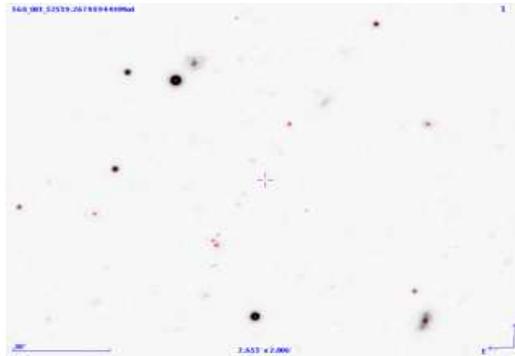
Once applied to our data, the scale was found to be 201.996 *mas/pixel* which is really close to the theoretical value of 202 *mas* [8].

Figure 4 shows twice a field centred at (22:41:09.79,-07:44:22.6): in Fig. 4(a) ($2'.653 \times 2'.006$) the initial SUBARU image, where no astrometric calibration was introduced we note an offset between the star in the image and the stars for the catalog, represented by a sign +, the offset can attain $2''.835$. On the other, on Fig 4(b) ($2'.651 \times 2'.006$) we have a perfect match between the catalog and the sources in the image after the astrometric calibration. These figures were obtained using the ALADIN interactive sky tool of the V.O. (Virtual Observatory) [2].

Once the astrometric calibration done, we are able to determine the RA (α) and DEC(δ) at the beginning and the end of the end trail and thus compute the asteroid motion vector as was done in [16], [20] and references therein. We compute by the same method preliminary orbital elements (semi-major axis a and inclination I , by assuming a circular orbit). As the purpose of this paper is to explain the numerical methods used for identification of the asteroids and set its limits, we will not be explaining the identification of the populations (see [4], [16], [20] and references therein).



(a) Initial SUBARU image



(b) after astrometric calibration

Figure 4: Astrometric calibration using the GBOT pipeline.

In the next sections we will be introducing the method that will be used for the photometric analysis of the SMABAS-III data.

3. Photometric-analysis using the GBOT-pipeline

One of our interests in analyzing the SMBAS-III data, is to study the size and taxonomic distributions of the identified populations, investigate the spin period distributions of each of S-type and C-type group, and retrieve their light curves. We will be using for this purpose the GAIA-GBOT pipeline [3], that was not initially destined for this task. We proceed as follows:

- We input the ephemeris of the asteroid (identified previously), by giving its initial position at the first epoch of detection in the field as well as

its proper motion vector, this information is then updated into the .fits files headers.

- As was done for the astrometric calibration (Sect. 2.1.4), the stars in the field are identified and their positions and fluxes measured. The photometric calibration is done by cross-identifying with the GSC2.3 photometric star catalog [6].
- It then goes through all the exposures, one by one, and follows the target (the asteroid) reporting its position and measuring its flux, the magnitude is then computed.

As an example, Fig. 5 shows the light curves obtained using the GBOT-pipeline for two detected (unkown) asteroid, in chip3. The orbital as well as taxonomical elements relative to these asteroids are given in Table 3.

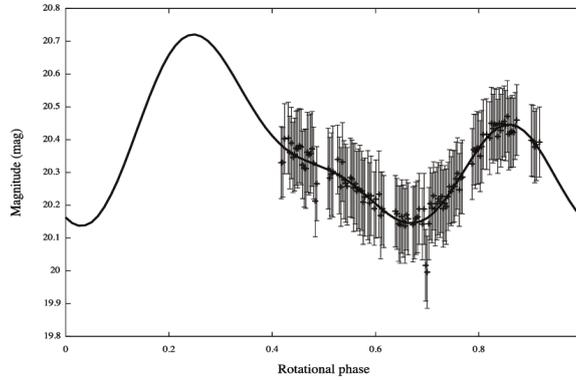
epoch	α	δ	B	R	Class	period (h)	a	i	Fig.
52519.278175	22:41:18.6591	-7:39:05.4544		20.330 ± 0.110					
52519.268843	22:41:19.1777	-7:39:03.3455	21.358 ± 0.184		D or S	15.84 ± 0.96	2.56063	3.93947	5(a)
52519.410452	22:41:19.4399	-7:39:14.7420		18.459 ± 0.11					
52519.415906	22:41:19.6848	-7:39:15.92532	19.277 ± 0.230		D or S	4.08 ± 0.72	3.10628	4.30978	5(b)

Table 3: Orbital and taxonomical elements of the detected asteroids.

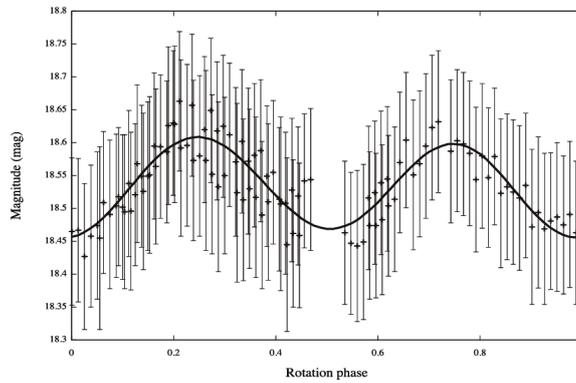
4. Conclusions

The aim of this paper was to present the different methods that will be used in the analysis of the SMBAS-III data. We have presented two methods for detecting the moving objects (asteroids): the classical eye-method detection that was used in the SMBAS-I and II analysis, and a new numerical method. The use of numerical, automated detection methods is necessary for the future, though it is clear that more work will be necessary to improve the efficiency of detection.

We have also used another powerful automated tool, the GBOT-pipeline, for the photometry. This pipeline not initially destined for this purpose, has proven to be very efficient for this task. The use of the GBOT in this context has also allowed some technical improvements of pipeline.



(a) Slow rotator asteroid: Light curve (R-band) for a detected (unknown) asteroid in Chip3. The total integration time is 07:59:34.656



(b) Light curve (R-band) for a detected (unknown) asteroid in Chip2-3. The total integration time is 06:24:40.896.

Figure 5: Asteroid light curves obtained using the GBOT pipeline.

Acknowledgements

We would like to thank Sebastien Bouquillon (developer of the GBOT-pipeline), who has allowed us using this powerful tool to its maximum potential.

References

- [1] Baba H., et al., 2002, ASPC, 281, 298

- [2] Bonnarel F., et al., 2000, *A&AS*, 143, 33
- [3] Bouquillon S., Taris F., Barache C., Carlucci T., Altmann M., Andrei A. H., Smart R., Steele I. A., 2012, *LPICo*, 1667, 6100
- [4] Bowell, E., Skiff, B. A., & Wasserman, L. H. 1990, *Asteroids, Comets, Meteors III*, 19.
- [5] Dermawan B., Nakamura T., Yoshida F., 2011, *PASJ*, 63, 555
- [6] Lasker, B. M., Lattanzi, M. G., McLean, B. J., et al. 2008, *AJ*, 136, 735
- [7] Millis R. L., Buie M. W., Wasserman L. H., Elliot J. L., Kern S. D., Wagner R. M., 2002, *AJ*, 123, 2083
- [8] Miyazaki S., et al., 2002, *PASJ*, 54, 833
- [9] Nakamura T., 1997, *ceme.symp*, 274
- [10] Nakamura, T., & Yoshida, F. 2008, *PASJ*, 60, 293
- [11] Nakamura, T., & Yoshida, F. 2002, *PASJ*, 54, 1079
- [12] Souami, D., Yoshida, F., Anderson, J., et al. 2012, *LPI Contributions*, 1667, 6061
- [13] Ouchi M., et al., 2004, *ApJ*, 611, 660
- [14] Roeser S., Demleitner M., Schilbach E., 2010, *AJ*, 139, 2440
- [15] Yagi M., Kashikawa N., Sekiguchi M., Doi M., Yasuda N., Shimasaku K., Okamura S., 2002, *AJ*, 123, 66
- [16] Yoshida F., et al., 2001, *PASJ*, 53, L13
- [17] Yoshida F., Nakamura T., Watanabe J.-I., Kinoshita D., Yamamoto N., Fuse T., 2003, *PASJ*, 55, 701
- [18] Yoshida F., Nakamura T., 2004, *AdSpR*, 33, 1543
- [19] Yoshida F., Nakamura T., 2005, *AJ*, 130, 2900
- [20] Yoshida F., Nakamura T., 2007, *P&SS*, 55, 1113
- [21] Yoshida, F., & Nakamura, T. 2008, *PASJ*, 60, 297

TABLE DES MATIÈRES

Préface	ix
Abstract	1
Résumé	3
Liste des symboles et abréviations	5
1 Introduction	7
1.1 Histoire	7
1.2 Découverte de Cérès : La chasse à la planète manquante	10
1.2.1 Zach et la chasse à la planète manquante	10
1.2.2 Piazzini et la planète Cérès-Ferdinandea	12
1.3 Astéroïde ou planète	14
1.4 Formation du système solaire	15
1.5 Pourquoi s'intéresser aux astéroïdes	16
1.6 Contexte actuel	17
I Etude dynamique des populations d'astéroïdes	19
2 Système de référence : Le Plan invariable	21
2.1 Le Système International de Référence Céleste (ICRS)	21
2.2 Définition du plan invariable	22
2.2.1 Plan invariable ou invariant	23
2.3 Détermination du plan invariable	23
2.3.1 Dans le cadre de la mécanique classique	23
2.3.2 Dans le cadre relativiste	24
2.3.3 Méthode	25
2.4 Orientation du Plan Invariable (IP)	28
2.4.1 Cas du système basique (SB)	28
2.4.2 Cas du système dit plus complet (SPC)	34
2.4.3 Orientation à J2000.0	36
2.4.4 Contributions individuelles au moment angulaire total	37
2.4.5 Travaux sur l'orientation du plan invariable	38

2.5	Orientation des planètes par rapport à l'IP	39
3	Astéroïdes de la ceinture principale : Structure à grande échelle	41
3.1	Les groupements en matière d'éléments osculateurs	41
3.1.1	Les géocroiseurs	44
3.1.2	Les astéroïdes de la ceinture principale (MBAs)	46
3.2	Distributions des astéroïdes de la ceinture principale (MBAs)	48
3.3	Distribution des astéroïdes en terme de plans orbitaux	50
3.3.1	Justifications dynamiques	50
3.3.2	État de l'art	51
3.3.3	Distribution par rapport à d'autres plans de référence	55
3.4	Perturbations séculaires entre deux planètes	57
3.4.1	Mouvement séculaire de Jupiter et Saturne	60
3.5	Mouvement séculaire d'un astéroïde : effet de Jupiter et Saturne	67
3.6	Résumé et questions ouvertes	71
4	Etude dynamique de la famille Vesta	73
4.1	Les familles d'astéroïdes	75
4.1.1	Familles Hirayama	75
4.1.2	Autres études statistiques	75
4.1.3	Etudes dynamiques	76
4.1.4	Ecriture de la métrique	76
4.1.5	Méthodes	78
4.1.6	Nomenclature	79
4.2	Etude de la famille Vesta	79
4.2.1	Etude de l'effet Yarkowsky	80
4.2.2	Rencontres proches : vitesses relatives	82
4.3	Conclusions et perspectives	83
II	Analyse des données observationnelles du SUBARU	85
5	Traitement des données du télescope SUBARU : généralités	87
5.1	Le télescope SUBARU	87
5.2	Présentation de l'instrument	89
5.2.1	Configuration de la mosaïque	89
5.3	Données et survey SMBAS	90
5.4	Traitement des données	92
5.4.1	Prétraitement des images	93
5.4.2	Détection des astéroïdes	94
6	Traitement des données du SUBARU télescope : Applications	97
6.1	Application des méthodes de détections au Champ FIELDA	99
6.1.1	Application de la méthode automatique	99
6.1.2	Calibration astrométrique	101
6.2	Le problème de la détermination orbitale	102
6.2.1	Détermination du vecteur propre de vitesse écliptique	103

TABLE DES MATIÈRES

6.2.2	Détermination des éléments osculateurs	104
6.2.3	Analyse des populations identifiées	107
6.2.4	Photométrie et courbes de lumière	109
6.2.5	Période de rotation des astéroïdes	113
6.3	Perspectives	113
Conclusion		115
Annexes		117
A Distances entre planètes : Des sphères harmoniques de Ptolémée à la loi de Titius-Bode.		119
A.1	Introduction	119
A.2	Kepler et sa vision du monde	120
A.3	Loi de Titius-Bode	122
A.3.1	Formulation de Balgg-Richardson	123
B Annexe :Plan Invariable		125
B.1	Article	125
C Annexe relative aux chapitres concernant la dynamique		137
C.1	Paramètres physiques	137
C.2	Effets dissipatifs	137
C.2.1	Effet Yarkowsky	140
C.2.2	Effet YORP	142
D Données SMBAS		143
D.1	Liste des images utilisées pour la première nuit	143
D.2	Convolution	183
D.2.1	Définition mathématique	183
D.2.2	Application	183
D.3	Détermination de la vitesse angulaire des astéroïdes	184
D.4	Parallélisation du programme	186
D.5	Article sur les méthodes de détections	187
Bibliographie		203
CURRICULUM VITÆ		217

BIBLIOGRAPHIE

- B. A. Archinal, M. F. A'Hearn, A. Conrad, G. J. Consolmagno, R. Courtin, T. Fukushima, D. Hestroffer, J. L. Hilton, G. A. Krasinsky, G. Neumann, J. Oberst, P. K. Seidelmann, P. Stooke, D. J. Tholen, P. C. Thomas, and I. P. Williams. Erratum to : Reports of the IAU Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements : 2006 & 2009. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 110 :401–403, August 2011. doi : 10.1007/s10569-011-9362-2.
- P. Arnaudet. Principe de fonctionnement des CCD. *Quasar 95, Club d'astronomie de Frouville*, 2002.
- Pierre Aubenque. Aristote, encyclopædia universalis [en ligne], consulté le 4 octobre 2012. url : <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/aristote/>, 2012.
- H. Baba, N. Yasuda, S.-I. Ichikawa, M. Yagi, N. Iwamoto, T. Takata, T. Horaguchi, M. Taga, M. Watanabe, T. Ozawa, and M. Hamabe. Development of the Subaru-Mitaka-Okayama-Kiso Archive System. In D. A. Bohlender, D. Durand, and T. H. Handley, editors, *Astronomical Data Analysis Software and Systems XI*, volume 281 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 298, 2002.
- D. Bancelin. Etude de la dynamique des astéroïdes géocroiseurs : Application à (99942) Apophis, December 2011.
- G. Beekman. I. O. Yarkovsky and the Discovery of 'his' Effect. *Journal for the History of Astronomy*, 37 :71–86, February 2006.
- P. Bendjoya. A Classification of 6479 Asteroids Into Families by Means of the Wavelet Clustering Method. *A&AS*, 102 :25–55, November 1993a.
- P. Bendjoya. A comparison between 2D and 3D wavelet analysis method for asteroid family dynamical study. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 57 :29–36, October 1993b. doi : 10.1007/BF00692458.
- P. Bendjoya and E. Slezak. Wavelet analysis and applications to some dynamical systems. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 56 :231–262, May 1993. doi : 10.1007/BF00699735.
- P. Bendjoya, E. Slezak, and C. Froeschle. The wavelet transform - A new tool for asteroid family determination. *A&A*, 251 :312–330, November 1991.
- P. Bendjoya, A. Cellino, C. Froeschle, and V. Zappala. Simulated families : A test for different

- methods of family identification. In A. W. Harris and E. Bowell, editors, *Asteroids, Comets, Meteors 1991*, pages 57–60, December 1992.
- F. Bonnarel, P. Fernique, O. Bienaymé, D. Egret, F. Genova, M. Louys, F. Ochsenbein, M. Wenger, and J. G. Bartlett. The ALADIN interactive sky atlas. A reference tool for identification of astronomical sources. *A&AS*, 143 :33–40, April 2000. doi : 10.1051/aas:2000331.
- W. F. Bottke, D. Vokrouhlický, M. Brož, D. Nesvorný, and A. Morbidelli. Dynamical Spreading of Asteroid Families by the Yarkovsky Effect. *Science*, 294 :1693–1696, November 2001. doi : 10.1126/science.1066760.
- W. F. Bottke, D. Vokrouhlický, D. Minton, D. Nesvorný, A. Morbidelli, R. Brasser, B. Simonson, and H. F. Levison. An Archaean heavy bombardment from a destabilized extension of the asteroid belt. *Nature*, 485 :78–81, May 2012. doi : 10.1038/nature10967.
- W. F. Bottke, Jr., D. Vokrouhlický, D. P. Rubincam, and D. Nesvorný. The Yarkovsky and Yorp Effects : Implications for Asteroid Dynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34 :157–191, May 2006. doi : 10.1146/annurev.earth.34.031405.125154.
- S. Bouquillon, F. Taxis, C. Barache, T. Carlucci, M. Altmann, A. H. Andrei, R. Smart, and I. A. Steele. Gaia-GBOT Pipeline : A Precise Astrometric Measuring Tool for Moving Celestial Bodies. *LPI Contributions*, 1667 :6100, May 2012.
- E. Bowell, B. A. Skiff, and L. H. Wasserman. Orbital Information from Asteroid Motion Vectors. In C. I. Lagerkvist, H. Rickman, and B. A. Lindblad, editors, *Asteroids, Comets, Meteors III*, page 19, 1990.
- P. Bretagnon. Termes a longues periodes dans le systeme solaire. *A&A*, 30 :141–154, January 1974.
- D. Brouwer. Secular variations of the orbital elements of minor planets. *AJ*, 56 :9, March 1951. doi : 10.1086/106480.
- D. Brouwer and G. M. Clemence. *Methods of celestial mechanics*. Academic Press Inc, Dec 1961.
- D. Brož. Yarkovsky Effect and the Dynamics of the Solar System, 2006.
- M. Brož and D. Vokrouhlický. Asteroid families in the first-order resonances with Jupiter. *MNRAS*, 390 :715–732, October 2008. doi : 10.1111/j.1365-2966.2008.13764.x.
- M. Brož, D. Vokrouhlický, F. Roig, D. Nesvorný, W. F. Bottke, and A. Morbidelli. The population of asteroids in the 2 :1 mean motion resonance with Jupiter revised. In Z. Knežević & A. Milani, editor, *IAU Colloq. 197 : Dynamics of Populations of Planetary Systems*, pages 179–186, February 2005. doi : 10.1017/S1743921304008634.
- M. Brož, D. Vokrouhlický, W. F. Bottke, D. Nesvorný, A. Morbidelli, and D. Capek. Non-gravitational forces acting on small bodies. In L. Daniela, M. Sylvio Ferraz, & F. J. Angel, editor, *Asteroids, Comets, Meteors*, volume 229 of *IAU Symposium*, pages 351–365, 2006. doi : 10.1017/S1743921305006848.
- M. Brož. *Yarkovsky Effect and the Dynamics of the Solar System*. PhD thesis, 2006.

- Bureau des longitudes. Ephémérides astronomiques : Connaissance des temps. EDP, Sciences, 2012.
- G. Burkhardt. On the invariable plane of the solar system. *A&A*, 106 :133–136, February 1982.
- S. J. Bus and R. P. Binzel. Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey A Feature-Based Taxonomy. *Icarus*, 158 :146–177, July 2002. doi : 10.1006/icar.2002.6856.
- V. Carruba and T. A. Michtchenko. A frequency approach to identifying asteroid families. *A&A*, 475 :1145–1158, December 2007. doi : 10.1051/0004-6361:20077689.
- V. Carruba and T. A. Michtchenko. A frequency approach to identifying asteroid families. II. Families interacting with nonlinear secular resonances and low-order mean-motion resonances. *A&A*, 493 :267–282, January 2009. doi : 10.1051/0004-6361:200809852.
- V. Carruba, M. Huaman, R. Domingos, and F. Roig. September 2012a. "<http://goldenage2012.ifac.cnr.it/goldenage2012/presentazioni/>".
- V. Carruba, M. Huaman, S. Douwens, and R. C. Domingos. Chaotic diffusion caused by close encounters with several massive asteroids. The (4) Vesta case. *A&A*, 543 :A105, July 2012b. doi : 10.1051/0004-6361/201218908.
- B. Carry. Density of asteroids. *ArXiv e-prints*, March 2012.
- A. Cellino and A. Dell’Oro. Asteroid Dynamical Families. In J. Souchay & R. Dvorak, editor, *Lecture Notes in Physics, Berlin Springer Verlag*, volume 790 of *Lecture Notes in Physics, Berlin Springer Verlag*, pages 137–193, March 2010. doi : 10.1007/978-3-642-04458-8_3.
- J. Chenal. Introduction à l’astronomie de position. In *Leçon aux élèves du Mastère de Photogrammétrie, Positionnement et Mesures de Déformations Option Géodésie*, Institut Géographique National- Ecol Nationale des Sciences Géographiques, February 2011.
- S. R. Chesley, S. J. Ostro, D. Vokrouhlický, D. Čapek, J. D. Giorgini, M. C. Nolan, J.-L. Margot, A. A. Hine, L. A. M. Benner, and A. B. Chamberlin. Direct Detection of the Yarkovsky Effect by Radar Ranging to Asteroid 6489 Golevka. *Science*, 302 :1739–1742, December 2003. doi : 10.1126/science.1091452.
- G. M. Clemence and D. Brouwer. The accuracy of the coordinates of the five outer planets and the invariable plane. *AJ*, 60 :118–+, May 1955. doi : 10.1086/107172.
- C. J. Cohen, E. C. Hubbard, and C. Oesterwinter. Planetary Elements for 10,000,000 Years. *Celestial Mechanics*, 7 :438–448, June 1973. doi : 10.1007/BF01227509.
- Pierre Costabel. Ptolémée claud (90 env.-env. 168), encyclopædia universalis [en ligne], consulté le 4 octobre 2012. url : <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/claude-ptolemee/>, 2012.
- J. Cresson. The stochastisation hypothesis and the spacing of planetary systems. *Journal of Mathematical Physics*, 52(11) :113502, November 2011. doi : 10.1063/1.3658279.
- Jacky Cresson. Jacky cresson, des lois de kepler aux lois de chaos : Cours d’histoire des sciences, licence 3, université de franche-comté, 2005.

- C. J. Cunningham. *The first asteroid : Ceres 1801-2001*. Star Press Lab., 2001.
- C. J. Cunningham. *Jousting for celestial glory : the discovery and study of Ceres and Pallas*. Star Press Lab., 2004.
- C. J. Cunningham, B. G. Marsden, and W. Orchiston. How the first dwarf planet became the asteroid Ceres. *Journal of Astronomical History and Heritage*, 12 :240–248, November 2009.
- P. S. De Laplace. *Oeuvres complètes de Laplace*, volume 11, pages 548 – 553. Gauthier-Villards et fils, Imprimeurs-libraires, 1878.
- M. M. D’Eliseo. On the Computation of the Laplace Coefficients. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 46 :159, June 1989.
- M. M. D’Eliseo. Generalized Laplace coefficients and Newcomb derivatives. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 98 :145–154, June 2007. doi : 10.1007/s10569-007-9068-7.
- J.-B. Delisle and J. Laskar. Chaotic diffusion of the Vesta family induced by close encounters with massive asteroids. *A&A*, 540 :A118, April 2012. doi : 10.1051/0004-6361/201118339.
- B. Dermawan, T. Nakamura, and F. Yoshida. Subaru Lightcurve Observations of Sub-km-Sized Main-Belt Asteroids. *PASJ*, 63 :555–, March 2011.
- P. Descamps. Equilibrium figures of inhomogeneous synchronous binary asteroids. *Icarus*, 207 :758–768, June 2010. doi : 10.1016/j.icarus.2009.12.011.
- E. Dublé. Entretien avec un débutant en BASH. *March Ed. LINUX Magazine, France*, 147 : 54–63, 2012.
- A. D. Dubyago. *The determination of orbits*. New York, Macmillan, 1961., 1961.
- J. Durech, D. Vokrouchlicky, D. Higgins, Y. Krugly, N. Gaftonyuk, V. Chiorny, V. Shevchenko, and M. Kaasalainen. Detection of the YORP Effect on Asteroid (1620) Geographos. *LPI Contributions*, 1405 :8392, 2008.
- S. Eggl and R. Dvorak. An Introduction to Common Numerical Integration Codes Used in Dynamical Astronomy. In *Dynamics of small solar system bodies and exoplanets*, volume 790 of *Lecture Notes in Physics*, Berlin Springer Verlag, pages 431–480, March 2010. doi : 10.1007/978-3-642-04458-8_9.
- P. Farinella, D. R. Davis, A. Cellino, and V. Zappala. From asteroid clusters to families : A proposal for a new nomenclature. In A. W. Harris and E. Bowell, editors, *Asteroids, Comets, Meteors 1991*, pages 165–166, December 1992.
- A. Fienga, H. Manche, P. Kuchynka, J. Laskar, and M. Gastineau. Planetary and Lunar ephemerides, INPOP10A. *ArXiv e-prints*, November 2010.
- M. Galiazzo, D. Souami, and J. Souchay. The Vesta Asteroid Family : Study of the family and close encounters with terrestrial planets. In *EPSC-DPS Joint Meeting 2011*, page 495, October 2011.
- M. A. Galiazzo, D. Souami, S. Eggl, and J. Souchay. The Vesta Asteroid Family : Study of the Family and Close Encounters with Terrestrial Planes and Dynamical Influences by (1) Ceres

- and (4) Vesta. In *Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts*, volume 43 of *Lunar and Planetary Inst. Technical Report*, page 1424, March 2012.
- R. W. Gaskell, O. S. Barnouin, and D. J. Scheeres. The NEAR Shoemaker Landing on Eros. In *Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts*, volume 41 of *Lunar and Planetary Inst. Technical Report*, page 2093, March 2010.
- R. Gomes, H. F. Levison, K. Tsiganis, and A. Morbidelli. Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets. *Nature*, 435 :466–469, May 2005. doi : 10.1038/nature03676.
- J. C. Gradie, C. R. Chapman, and E. F. Tedesco. Distribution of taxonomic classes and the compositional structure of the asteroid belt. In R. P. Binzel, T. Gehrels, and M. S. Matthews, editors, *Asteroids II*, pages 316–335, 1989.
- R. J. Hanisch, A. Farris, E. W. Greisen, W. D. Pence, B. M. Schlesinger, P. J. Teuben, R. W. Thompson, and A. Warnock, III. Definition of the Flexible Image Transport System (FITS). *A&A*, 376 :359–380, September 2001. doi : 10.1051/0004-6361:20010923.
- W. K. Hartmann, G. Ryder, L. Dones, and D. Grinspoon. *The Time-Dependent Intense Bombardment of the Primordial Earth/Moon System*, pages 493–512. University of Arizona Press, 2000.
- K. Hirayama. Groups of asteroids probably of common origin. *AJ*, 31 :185–188, October 1918. doi : 10.1086/104299.
- K. Hirayama. Further Note on the Families of Asteroid. *Proc. Phys.-Math. Soc. Japan*, 1 : 52–29, 1919.
- K. Hirayama. Families of Asteroids. *Japanese Journal of Astronomy and Geophysics*, 1 :55, 1922.
- K. Hirayama. Families of Asteroids. Second Paper. *Japanese Journal of Astronomy and Geophysics*, 5 :137–162, 1928.
- K. Hirayama. Present State of the Families of Asteroids. pages 482–485, 1933.
- M. Hoskin. The discovery of Uranus, the Titius-Bode law, and the asteroids. In R. Taton and C. Wilson, editors, *Planetary Astronomy from the Renaissance to the Rise of Astrophysics. Part B : The Eighteenth and Nineteenth Centuries*, pages 169–180, 1995.
- Résolution 5 IAU. Résolution 5. *IAU resolutions*, August 2006.
- Résolution A4 IAU. Résolution A4. *IAU resolutions*, August 1991.
- Résolution B2 IAU. Résolution B2. *IAU resolutions*, August 1997.
- Résolution B3 IAU. Résolution B3. *IAU resolutions*, August 2009.
- IMCCE. Ephemeris generator, 2011.
- R. T. A. Innes. The Invariable Plane of the Solar System. *Circular of the Union Observatory Johannesburg*, 50 :72–72, July 1920.
- D. Jewitt, J. Luu, and B. G. Marsden. 1992 QB1. *IAU Circ.*, 5611 :1, September 1992.

- W. A. Joye and E. Mandel. New Features of SAOImage DS9. In H. E. Payne, R. I. Jedrzejewski, and R. N. Hook, editors, *Astronomical Data Analysis Software and Systems XII*, volume 295 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 489, 2003.
- Y. Kamata, S. Miyazaki, H. Nakaya, H. Suzuki, Y. Miyazaki, and M. Muramatsu. Characterization and performance of hyper Suprime-Cam CCD. In *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, volume 7742 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, July 2010. doi : 10.1117/12.857806.
- J. Kepler. *Le secret du monde. Tr. fr. par Alain Segonds, à partir des notes de Cousin, Louis-Paul, 1984.* Gallimard,, 1596.
- D. G. King-Hele. The Titius-Bode Law of Planetary Distances, by Michael Martin Nieto. *Journal for the History of Astronomy*, 4 :141–+, 1973.
- Z. Knežević and A. Milani. Proper element catalogs and asteroid families. *A&A*, 403 :1165–1173, June 2003. doi : 10.1051/0004-6361:20030475.
- A. S. Konopliv, J. K. Miller, W. M. Owen, D. K. Yeomans, J. D. Giorgini, R. Garmier, and J.-P. Barriot. A Global Solution for the Gravity Field, Rotation, Landmarks, and Ephemeris of Eros. *Icarus*, 160 :289–299, December 2002. doi : 10.1006/icar.2002.6975.
- P. Kuchynka, J. Laskar, A. Fienga, and H. Manche. A ring as a model of the main belt in planetary ephemerides. *A&A*, 514 :A96, May 2010. doi : 10.1051/0004-6361/200913346.
- Petr Kuchynka. Etude de perturbations induites par les astéroïdes sur les mouvements des planètes et des sondes spatiales autour du point de Lagrange L₂, 2010.
- J. Laskar. Numerical experiment on the chaotic behaviour of the solar system. In *Bulletin of the American Astronomical Society*, volume 20 of *Bulletin of the American Astronomical Society*, page 1125, 1988.
- J. Laskar. On the Spacing of Planetary Systems. *Physical Review Letters*, 84 :3240–3243, April 2000. doi : 10.1103/PhysRevLett.84.3240.
- J. Laskar. Is the Solar System Stable ? *ArXiv e-prints*, September 2012.
- J. Laskar and P. Robutel. High order symplectic integrators for perturbed Hamiltonian systems. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 80 :39–62, July 2001.
- J. Laskar, M. Gastineau, J.-B. Delisle, A. Farrés, and A. Fienga. Strong chaos induced by close encounters with Ceres and Vesta. *A&A*, 532 :L4, August 2011. doi : 10.1051/0004-6361/201117504.
- B. M. Lasker, M. G. Lattanzi, B. J. McLean, B. Bucciarelli, R. Drimmel, J. Garcia, G. Greene, F. Guglielmetti, C. Hanley, G. Hawkins, V. G. Laidler, C. Loomis, M. Meakes, R. Mignani, R. Morbidelli, J. Morrison, R. Pannunzio, A. Rosenberg, M. Sarasso, R. L. Smart, A. Spagna, C. R. Sturch, A. Volpicelli, R. L. White, D. Wolfe, and A. Zacchei. The Second-Generation Guide Star Catalog : Description and Properties. *AJ*, 136 :735–766, August 2008. doi : 10.1088/0004-6256/136/2/735.
- A. Lemaitre. Hungaria : A Potential New Family. In Y. Kozai, R. P. Binzel, & T. Hirayama, editor, *75 Years of Hirayama Asteroid Families : The Role of Collisions in the Solar System*

- History*, volume 63 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, pages 140–+, 1994.
- James Lequeux. *Astronomie, encyclopaedia universalis* [en ligne], consulté le 4 octobre 2012. url : <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/astronomie/>, 2012.
- J. H. Lieske. Precession matrix based on IAU /1976/ system of astronomical constants. *A&A*, 73 :282–284, March 1979.
- J. H. Lieske, T. Lederle, W. Fricke, and B. Morando. Expressions for the precession quantities based upon the IAU /1976/ system of astronomical constants. *A&A*, 58 :1–16, June 1977.
- B. A. Lindblad. A computer search for asteroid families. In A. W. Harris and E. Bowell, editors, *Asteroids, Comets, Meteors 1991*, pages 363–366, December 1992.
- B. A. Lindblad and R. B. Southworth. A Study of Asteroid Families and Streams by Computer Techniques. *NASA Special Publication*, 267 :337, 1971.
- N. R. Lomb. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *Ap&SS*, 39 :447–462, February 1976. doi : 10.1007/BF00648343.
- S. C. Lowry, A. Fitzsimmons, P. Pravec, D. Vokrouhlický, H. Boehnhardt, P. A. Taylor, J.-L. Margot, A. Galád, M. Irwin, J. Irwin, and P. Kusnirák. Direct Detection of the Asteroidal YORP Effect. *Science*, 316 :272–, April 2007. doi : 10.1126/science.1139040.
- B. Luzum, N. Capitaine, A. Fienga, W. Folkner, T. Fukushima, J. Hilton, C. Hohenkerk, G. Krainsky, G. Petit, E. Pitjeva, M. Soffel, and P. Wallace. The IAU 2009 system of astronomical constants : the report of the IAU working group on numerical standards for Fundamental Astronomy. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, pages 30–+, July 2011. doi : 10.1007/s10569-011-9352-4.
- C. Ma, E. F. Arias, T. M. Eubanks, A. L. Fey, A.-M. Gontier, C. S. Jacobs, O. J. Sovers, B. A. Archinal, and P. Charlot. The International Celestial Reference Frame as Realized by Very Long Baseline Interferometry. *AJ*, 116 :516–546, July 1998. doi : 10.1086/300408.
- C. Ma, E. F. Arias, G. Bianco, D. A. Boboltz, S. L. Bolotin, P. Charlot, G. Engelhardt, A. L. Fey, R. A. Gaume, A.-M. Gontier, R. Heinkelmann, C. S. Jacobs, S. Kurdubov, S. B. Lambert, Z. M. Malkin, A. Nothnagel, L. Petrov, E. Skurikhina, J. R. Sokolova, J. Souchay, O. J. Sovers, V. Tesmer, O. A. Titov, G. Wang, V. E. Zharov, C. Barache, S. Boeckmann, A. Collioud, J. M. Gipson, D. Gordon, S. O. Lytvyn, D. S. MacMillan, and R. Ojha. The Second Realization of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry. *IERS Technical Note*, 35 :1, 2009.
- F. Marchis, P. Descamps, D. Hestroffer, and J. Berthier. Discovery of the triple asteroidal system 87 Sylvia. *Nature*, 436 :822–824, August 2005. doi : 10.1038/nature04018.
- F. M. McEachern, M. Čuk, and S. T. Stewart. Dynamical evolution of the Hungaria asteroids. *Icarus*, 210 :644–654, December 2010. doi : 10.1016/j.icarus.2010.08.003.
- V. V. Michkovitch. Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System. *Publications de l’Institut Mathématique de l’Académie Serbe des Arts et Sciences*, (S.S.) I (01) :62–70, 1947.

- F. Migliorini, A. Morbidelli, V. Zappala, B. J. Gladman, M. E. Bailey, and A. Cellino. Vesta fragments from ν_6 and 3 : 1 resonances : Implications for V-type NEAs and HED meteorites. *Meteoritics and Planetary Science*, 32 :903–916, November 1997.
- A. Milani, Z. Knežević, B. Novaković, and A. Cellino. Dynamics of the Hungaria asteroids. *Icarus*, 207 :769–794, June 2010. doi : 10.1016/j.icarus.2009.12.022.
- R. L. Millis, M. W. Buie, L. H. Wasserman, J. L. Elliot, S. D. Kern, and R. M. Wagner. The Deep Ecliptic Survey : A Search for Kuiper Belt Objects and Centaurs. I. Description of Methods and Initial Results. *AJ*, 123 :2083–2109, April 2002. doi : 10.1086/339481.
- S. Miyazaki, Y. Komiyama, M. Sekiguchi, S. Okamura, M. Doi, H. Furusawa, M. Hamabe, K. Imi, M. Kimura, F. Nakata, N. Okada, M. Ouchi, K. Shimasaku, M. Yagi, and N. Yasuda. Subaru Prime Focus Camera – Suprime-Cam. *PASJ*, 54 :833–853, December 2002.
- A. Morbidelli and D. Vokrouhlický. The Yarkovsky-driven origin of near-Earth asteroids. *Icarus*, 163 :120–134, May 2003. doi : 10.1016/S0019-1035(03)00047-2.
- A. Morbidelli, H. F. Levison, K. Tsiganis, and R. Gomes. Chaotic capture of Jupiter’s Trojan asteroids in the early Solar System. *Nature*, 435 :462–465, May 2005. doi : 10.1038/nature03540.
- M. D. Moutsoulas. Selenographic Control. *Moon*, 8 :461, October 1973. doi : 10.1007/BF00562070.
- T. G. Mueller and J. S. V. Lagerros. Asteroids as far-infrared photometric standards for ISO-PHOT. *A&A*, 338 :340–352, October 1998.
- C. D. Murray and S. F. Dermott. *Solar system dynamics*. Cambridge University Press, 1999.
- T. Nakamura. Statistical Survey Observations of Faint Belt Asteroids with SUBARU-class Telescopes. In H. Kinoshita and H. Nakai, editors, *29th Symposium on Celestial Mechanics*, page 274, 1997.
- D. Nesvorný and W. F. Bottke. Detection of the Yarkovsky effect for main-belt asteroids. *Icarus*, 170 :324–342, August 2004. doi : 10.1016/j.icarus.2004.04.012.
- D. Nesvorný and D. Vokrouhlický. Analytic Theory for the Yarkovsky-O Effect on Obliquity. *AJ*, 136 :291–299, July 2008. doi : 10.1088/0004-6256/136/1/291.
- D. Nesvorný, R. Jedicke, R. J. Whiteley, and Ž. Ivezić. Evidence for asteroid space weathering from the Sloan Digital Sky Survey. *Icarus*, 173 :132–152, January 2005. doi : 10.1016/j.icarus.2004.07.026.
- D. Nesvorný, F. Roig, B. Gladman, D. Lazzaro, V. Carruba, and T. Mothé-Diniz. Fugitives from the Vesta family. *Icarus*, 193 :85–95, January 2008. doi : 10.1016/j.icarus.2007.08.034.
- M. M. Nieto. *The Titius-Bode law of planetary distances : Its history and theory*. International Series of Monographs in Natural Philosophy, Oxford : Pergamon Press, 1972, 1972.
- A. M. Nobili, A. Milani, and M. Carpino. Fundamental frequencies and small divisors in the orbits of the outer planets. *A&A*, 210 :313–336, February 1989.

- L. Nottale. Scale-relativity and quantization of extra-solar planetary systems. *A&A*, 315 : L9–L12, November 1996.
- L. Nottale, G. Schumacher, and E. T. Lefèvre. Scale-relativity and quantization of exoplanet orbital semi-major axes. *A&A*, 361 :379–387, September 2000.
- M. Ouchi, K. Shimasaku, S. Okamura, H. Furusawa, N. Kashikawa, K. Ota, M. Doi, M. Hamabe, M. Kimura, Y. Komiyama, M. Miyazaki, S. Miyazaki, F. Nakata, M. Sekiguchi, M. Yagi, and N. Yasuda. Subaru Deep Survey. V. A Census of Lyman Break Galaxies at $z \sim 4$ and 5 in the Subaru Deep Fields : Photometric Properties. *ApJ*, 611 :660–684, August 2004. doi : 10.1086/422207.
- N. Outters. INSTRUMENTS ET TECHNIQUES : ASTRONOMIE ET CCD, Les prétraitements. *l'Astronomie*, 120 :36–39, 2006.
- Clémence Ramnoux. Anaximandre (vie s.), encyclopædia universalis [en ligne], consulté le 4 octobre 2012. url : <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/anaximandre/>, 2012.
- R. O. Redman, P. A. Feldman, and H. E. Matthews. High-Quality Photometry of Asteroids at Millimeter and Submillimeter Wavelengths. *AJ*, 116 :1478–1490, September 1998. doi : 10.1086/300495.
- S. Roeser, M. Demleitner, and E. Schilbach. The PPMXL Catalog of Positions and Proper Motions on the ICRS. Combining USNO-B1.0 and the Two Micron All Sky Survey (2MASS). *AJ*, 139 :2440–2447, June 2010. doi : 10.1088/0004-6256/139/6/2440.
- F. Roig, D. Nesvorný, and S. Ferraz-Mello. Asteroids in the 2 : 1 resonance with Jupiter : dynamics and size distribution. *MNRAS*, 335 :417–431, September 2002. doi : 10.1046/j.1365-8711.2002.05635.x.
- D. P. Rubincam. LAGEOS orbit decay due to infrared radiation from earth. *J. Geophys. Res.*, 92 :1287–1294, February 1987. doi : 10.1029/JB092iB02p01287.
- D. P. Rubincam. Asteroid orbit evolution due to thermal drag. *J. Geophys. Res.*, 100 :1585–1594, January 1995. doi : 10.1029/94JE02411.
- D. P. Rubincam. Yarkovsky thermal drag on small asteroids and Mars-Earth delivery. *J. Geophys. Res.*, 103 :1725–1732, January 1998. doi : 10.1029/97JE03034.
- D. P. Rubincam. Radiative Spin-up and Spin-down of Small Asteroids. *Icarus*, 148 :2–11, November 2000. doi : 10.1006/icar.2000.6485.
- D. P. Rubincam and W. F. Bottke. The YORP Effect and the Spin of Small Asteroids. In *Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts*, volume 31 of *Lunar and Planetary Inst. Technical Report*, page 1399, March 2000.
- D. P. Rubincam, P. Knocke, V. R. Taylor, and S. Blackwell. Earth anisotropic reflection and the orbit of LAGEOS. *J. Geophys. Res.*, 92 :11662–11668, October 1987. doi : 10.1029/JB092iB11p11662.
- Petr Scheirich. <http://sajri.astronomy.cz/asteroidgroups/groups.htm>, 2005.

- M. Schiller, J. Baker, J. Creech, C. Paton, M.-A. Millet, A. Irving, and M. Bizzarro. Rapid Timescales for Magma Ocean Crystallization on the Howardite-Eucrite-Diogenite Parent Body. *ApJ*, 740 :L22, October 2011. doi : 10.1088/2041-8205/740/1/L22.
- L. D. Schmadel. *Dictionary of minor planet names*. Springer, 2003.
- T. J. J. See. On the Degree of Accuracy Attainable in Determining the Position of Laplace's Invariable Plane of the Planetary System. *Astronomische Nachrichten*, 164 :161–+, January 1904.
- P. K. Seidelmann, B. A. Archinal, M. F. A'Hearn, A. Conrad, G. J. Consolmagno, D. Hestroffer, J. L. Hilton, G. A. Krasinsky, G. Neumann, J. Oberst, P. Stooke, E. F. Tedesco, D. J. Tholen, P. C. Thomas, and I. P. Williams. Report of the IAU/IAG Working Group on cartographic coordinates and rotational elements : 2006. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 98 :155–180, July 2007. doi : 10.1007/s10569-007-9072-y.
- J.L Simon. numerical ephemeris. private communication, 2011.
- D. Souami. Stage de Master 1 : Etudes Statistiques des Vitesses d'impacts avec (1) Cerès, (2) Pallas, (3) Juno et (4) Vesta., 2007.
- D. Souami and J. Souchay. The solar system's invariable plane. *A&A*, 543 :A133, July 2012. doi : 10.1051/0004-6361/201219011.
- D. Souami and J Souchay. Poster presented at the *Journées 2011 Systèmes de Référence Spatio-temporels* : The Invariable Plane of the Solar system : a natural reference frame in the study of the dynamics of solar system bodies, 2011.
- D. Souami, M. Galiazzo, S. Eggl, D. Bancelin, and J. Souchay. Long-term study of the Vesta family. *MNRAS*, 2012a. in prep.
- D. Souami, M. Galiazzo, S. Eggl, J. Souchay, and D. Bancelin. The Vesta Asteroid Family : Study of the Family and Close Encounters with Terrestrial Planets (II). *LPI Contributions*, 1667 :6060, May 2012b.
- D. Souami, F. Yoshida, J. Anderson, T. Nakamura, B. Dermawan, Y. Masafumi, and J. Souchay. Near-ecliptic Small Main Belt Asteroid Survey (SMBAS) : asteroid detection, taxonomic and population classification, light curves. *MAPS*, September 2012c. submitted.
- D. Souami, F. Yoshida, J. Anderson, T. Nakamura, D. Dermawan, and J. Souchay. Sub-Km Main Belt Asteroids : SUBARU (Suprime-Cam) Observations of the Deep Ecliptic Field. *LPI Contributions*, 1667 :6061, May 2012d.
- R. B. Southworth and G. S. Hawkins. Statistics of meteor streams. *Smithsonian Contributions to Astrophysics*, 7 :261, 1963.
- E M Standish. Jpl planetary and lunar ephemerides, de405/le405. *JPL IOM 312F 98 048*, 1998.
- J.-L. Starck and F. Murtagh. *Astronomical Image and Data Analysis*. Springer, 2006. doi : 10.1007/978-3-540-33025-7.

- J. Thomas. *Universal Pronouncing Dictionary Of Biography And Mythology Part One*. Kes-singer Publishing Co, 2005.
- S. Tremaine, J. Touma, and F. Namouni. Satellite Dynamics on the Laplace Surface. *AJ*, 137 : 3706–3717, March 2009. doi : 10.1088/0004-6256/137/3/3706.
- K. Tsiganis. Early dynamical evolution of the Solar System : constraints from asteroid and KBO dynamics. In D. W. Kurtz, editor, *IAU Colloq. 196 : Transits of Venus : New Views of the Solar System and Galaxy*, pages 279–292, April 2005. doi : 10.1017/S1743921305001468.
- K. Tsiganis, R. Gomes, A. Morbidelli, and H. F. Levison. Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System. *Nature*, 435 :459–461, May 2005. doi : 10.1038/nature03539.
- G. B. Valsecchi and G. F. Gronchi. The ever changing population of large NEAs : a global view. In *EPSC-DPS Joint Meeting 2011*, page 402, October 2011.
- Jean-Pierre Verdet. Universalis, jean-pierre verdet, « copernic nicolas - (1473-1543) », encyclopædia universalis [en ligne], consulté le 4 octobre 2012. url : <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/nicolas-copernic/>, 2012a.
- Jean-Pierre Verdet. Géocentrisme, encyclopædia universalis [en ligne], consulté le 4 octobre 2012. url : <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/geocentrisme/>, 2012b.
- P. Vernazza, T. Mothé-Diniz, M. A. Barucci, M. Birlan, J. M. Carvano, G. Strazzulla, M. Fulchignoni, and A. Migliorini. Analysis of near-IR spectra of 1 Ceres and 4 Vesta, targets of the Dawn mission. *A&A*, 436 :1113–1121, June 2005. doi : 10.1051/0004-6361:20042506.
- D. Vokrouhlický. Diurnal Yarkovsky effect as a source of mobility of meter-sized asteroidal fragments. I. Linear theory. *A&A*, 335 :1093–1100, July 1998.
- D. Vokrouhlický. A complete linear model for the Yarkovsky thermal force on spherical asteroid fragments. *A&A*, 344 :362–366, April 1999.
- D. Vokrouhlický, D. Čapek, M. Kaasalainen, and S. J. Ostro. Detectability of YORP rotational slowing of asteroid 25143 Itokawa. *A&A*, 414 :L21–L24, January 2004. doi : 10.1051/0004-6361:20031739.
- D. Vokrouhlický, M. Brož, W. F. Bottke, D. Nesvorný, and A. Morbidelli. Non-gravitational perturbations and evolution of the asteroid main belt. In Z. Knežević & A. Milani, editor, *IAU Colloq. 197 : Dynamics of Populations of Planetary Systems*, pages 145–156, February 2005. doi : 10.1017/S1743921304008609.
- Franz von Zach. On a New Primary Planet of our Solar System, Long Suspected Between Mars and Jupiter, Now Possibly Discovered. *MONATLICHE CORRESPONDENZ*, 1801.
- M. Yagi, N. Kashikawa, M. Sekiguchi, M. Doi, N. Yasuda, K. Shimasaku, and S. Okamura. Luminosity Functions of 10 Nearby Clusters of Galaxies. I. Data. *AJ*, 123 :66–86, January 2002. doi : 10.1086/324731.
- F. Yoshida and T. Nakamura. Basic nature of sub-km main-belt asteroids : their size and spatial

- distributions. *Advances in Space Research*, 33 :1543–1547, January 2004. doi : 10.1016/S0273-1177(03)00458-7.
- F. Yoshida and T. Nakamura. Size Distribution of Faint Jovian L4 Trojan Asteroids. *AJ*, 130 : 2900–2911, December 2005. doi : 10.1086/497571.
- F. Yoshida and T. Nakamura. Subaru Main Belt Asteroid Survey (SMBAS)-Size and color distributions of small main-belt asteroids. *Planet. Space Sci.*, 55 :1113–1125, June 2007. doi : 10.1016/j.pss.2006.11.016.
- F. Yoshida, T. Nakamura, T. Fuse, Y. Komiyama, M. Yagi, S. Miyazaki, S. Okamura, M. Ouchi, and M. Miyazaki. First Subaru Observations of Sub-km Main-Belt Asteroids. *PASJ*, 53 : L13–L16, August 2001.
- F. Yoshida, T. Nakamura, J.-I. Watanabe, D. Kinoshita, N. Yamamoto, and T. Fuse. Size and Spatial Distribution of Sub-km Main-Belt Asteroids. *PASJ*, 55 :701–715, June 2003.
- F. Yoshida, B. Dermawan, T. Ito, Y. Sawabe, M. Haji, R. Saito, M. Hirai, T. Nakamura, Y. Sato, T. Yanagisawa, and R. Malhotra. Photometric Observations of a Very Young Family-Member Asteroid (832) Karin. *PASJ*, 56 :1105–1113, December 2004.
- V. Zappalà, A. Cellino, and P. Farinella. Hierarchical Clustering : How to Identify Asteroid Families and Assess their Reliability. In C. I. Lagerkvist, H. Rickman, and B. A. Lindblad, editors, *Asteroids, Comets, Meteors III*, page 211, 1990.
- V. Zappala, A. Cellino, P. Farinella, and Z. Knezevic. Asteroid families. I - Identification by hierarchical clustering and reliability assessment. *AJ*, 100 :2030–2046, December 1990. doi : 10.1086/115658.
- V. Zappala, A. Cellino, and P. Farinella. A comparison between families obtained from different proper elements. In A. W. Harris and E. Bowell, editors, *Asteroids, Comets, Meteors 1991*, pages 675–678, December 1992.
- V. Zappala, P. Bendjoya, A. Cellino, P. Farinella, and C. Froeschle. Asteroid families : Search of a 12,487-asteroid sample using two different clustering techniques. *Icarus*, 116 :291–314, August 1995. doi : 10.1006/icar.1995.1127.
- B. Zellner, A. Thirunagari, and D. Bender. The large-scale structure of the asteroid belt. *Icarus*, 62 :505–511, June 1985. doi : 10.1016/0019-1035(85)90190-3.

CURRICULUM VITÆ

- PUBLICATIONS
- J. Souchay, D. Souami, F. Yoshida, J. Anderson, T. Nakamura, B. Dermawan, M. Yagi, F. Taris and N. Bures. *Astrometry and Light Curves of Asteroids with the SUBARU Telescope*. NAROO conference proceedings. *Submitted*.
- D. Souami, F. Yoshida, J. Anderson, T. Nakamura, B. Dermawan, M. Yagi and J. Souchay. *Near-ecliptic Small Main Belt Asteroid Survey (SMBAS): asteroid detection, taxonomic and population classification, light curves*. MAPS (ACM proceedings). *Submitted*.
- S. Renner, B. Sicardy, D. Souami, C. Dumas & B. Carry. *VLT/NACO near-infrared observations of Neptune's ring arcs*. A&A. *in submission*
- D. Souami, J. Souchay. *The solar system's invariable plane*. A&A. vol. 543, 2012.
- Souami, D & Souchay, J. *The invariable plane of the solar system*. Proceedings of the Journées 2011 "Systèmes de référence spatio-temporels", Vienne 2011.
- TRAVAUX PRÉSENTÉS
- J. Souchay, N. Bures, F. Taris, D. Souami, F. Yoshida, T. Nakamura, B. Dermawan. *Astrometry and light curves of asteroids with SUBARU telescope*. NAROO-GAIA Workshop, Observatory of Paris, France.
- D. Souami, F. Yoshida, J. Anderson, T. Nakamura, B. Dermawan and J. Souchay. *Sub-Km Main Belt Asteroids: SUBARU (Suprime-Cam) observations of the deep ecliptic field*. ACM 2012, Niigata, Japan.
- D. Souami, M. Galiazzo, S. Eggl, J. Souchay and D. Bancelin. *The Vesta Asteroid Family: Study of the family and close encounters with terrestrial planets (II)*. ACM 2012, Niigata, Japan.
- D. Souami & J. Souchay. *The invariable plane of the solar system*. EGU 2012 Vienna.
- A. Walpersdorf, C. Sue, S. Baize, L. Thirard, N. Cotte, and the Briançon Team. *Repeated GPS measurements spanning 15 years to study the extensional deformation regime in the inner southwestern Alps (Briançon region, France)*. EGU 2012 Vienna.
- Galiazzo, M., Souami, D., Eggl, S. & Souchay, J. 43rd Lunar and Planetary Science Conference (2012). *The Vesta Asteroid Family: Study of the family and close encounters with terrestrial planets and dynamical influences by (1) Ceres and (4) Vesta*.
- Galiazzo, M., Souami, D., & Souchay, J. EPSC-DPS Joint Meeting, Nantes 2011. *The Vesta Asteroid Family: Study of the family and close encounters with the terrestrial planets*.
- Renner, S., Sicardy, B., Souami, D., & Dumas, C. EPSC-DPS Joint Meeting, Nantes 2011. *VLT/NACO observations of Neptune's ring arcs*.
- Souami, D., Souchay. Journées 2011 "Systèmes de référence spatio-temporels", Vienna 2011 *The Invariable plane of the Solar System: a natural reference frame in the study of the dynamics of solar system bodies*.
- Renner, S., Sicardy, B., Souami, D., Dumas, C. **Confinement mechanisms of Neptune's ring arcs: constraints from VLT images**. In: *CelmeC Meeting*, September, 2009. Poster.
- CONFÉRENCES, & SEMINAIRES FRÉQUENTÉS
- Gaia-FUN-SSO. September 2012. Observatoire de Paris, France.
 - Asteroids, Comets, Meteors 2012. Niigata, Japan. Mai 2012.
 - EGU 2012 Vienna, Austria. Avril 2012
 - 43rd Lunar and Planetary Science Conference. Houston, TX, USA. Mars 2012.
 - EPSC-DPS Joint Meeting, Nantes, France. Octobre 2011.
 - Journées 2011 "Systèmes de référence spatio-temporels", Vienna, Austria. Septembre 2011.

WORKSHOPS,
& ECOLES
THÉMATIQUES

Second EUFAR FP7 Training Course à Hyères - France (10 - 17 Septembre 2010)
«*Training and education for Turbulence via Airborne Data*».

International School à Porquerolles - France (2 - 10 Septembre 2010)
«*Fluctuations and Turbulence in the Microphysics and Dynamics of Clouds*».

Ecole Observatoire Virtuel - Strasbourg, France (2 - 4 Juin 2010)

Ecole thématique du CNRS à Cussac - France (2 - 8 Mai 2010)
«*Impacts et rencontres proches dans le système solaire*».

STAGES

Stage de M2 (Avril - Septembre 2009)

Stage de Master 2

- Sujet: *Dynamique des Arcs de Neptune: Analyses de données NACO 2007*.
- LESIA. Observatoire de Paris-Meudon, Meudon, France.
- Encadrants: Bruno Sicardy (LESIA / Observatoire de Paris-Meudon, Meudon, France)
Stefan Renner (IMCCE / Observatoire de Paris-Meudon, Lille, France)

Projet théorique (Octobre 2008 - Janvier 2009)

Dans le cadre du Master 2

- Sujet: *Relativistic theory for time and frequency transfer to order $1/c^4$* .
- Observatoire de Paris-Meudon, Paris, France
- Encadrant: Pierre Teyssandier (SYRTE / Observatory of Paris-Meudon, Paris, France).

Stage de Master 1 (Mai - Août 2007)

Stage de Master 2

- Sujet: *Statistical study of the velocity distribution among colliding asteroids*.
- SYRTE. Observatoire de Paris-Meudon, Paris, France.
- Encadrant: Jean Souchay (SYRTE / Observatory of Paris-Meudon, Paris, France)

Projet théorique (Octobre 2005 - Mai 2006)

Stage de Licence

- Sujet: *Weak and strong coupling limits in light-matter interaction, 'Polaritons'*.
- Cardiff University. School of Physics and Astronomy. Cardiff, UK.
- Encadrant: Professor Alexei Ivanov

FORMATIONS
COMPLÉMEN-
TAIRES

Sensibilisation à la conduite de projets, Avril 2010, Service d'Astrophysique/CEA Saclay.

Dynamique des galaxies, Mars 2010, Observatoire de Paris.

Initiation aux propositions sur grand-telescopes, Avril 2010, IAP (Institut Astrophysique de Paris).

Séminaire: connaître les entreprises et leur environnement, Mars 2010, UPMC.

Atelier: communiquer efficacement à l'écrit, Juin 2010, UPMC.

Séminaire : Innovation et Valorisation, Octobre-Novembre 2010, UPMC.

Simulations Numériques et Calculs Hautes Performances, Janvier 2011, CEA.

Atelier: Entraînez-vous à la prise de parole en public, Juin 2011, UPMC.

VULGARISATION & MÉDIATION SCIENTIFIQUE **Visite guidée de l'Observatoire de Meudon**, pour un groupe de 50 enfants (entre 8 et 10 ans).
Avril 2012.

Mission doctorale de Médiation scientifique (2010-2011).

- Dans le cadre du projet *Nano-Ecole* (Plan Nano-Innov) : Initiation au nano-monde en lycée et écoles primaires.
- Responsable: Sylvie Retailleau & Hugues Cazin (IEF, Université Paris Sud).

Membre de l'équipe organisatrice du 'Festival *Les chercheurs font leur cinéma*', pour les éditions 2011 et 2012, Doc'Up. UPMC, Paris, France.

OBSERVATIONS

- Transit de Vénus, dans le groupe de Thomas Widemann (LESIA - Observatoire de Meudon). 6 Juin, 2012. Observatoire de Pirka, Nayoro, Hokkaido, Japon.
- Campagne d'observation géodésique. Utilisation d'observation GPS pour étudier les déformations lentes des Alpes. Campagne organisée par Andrea Walpersdorf. 19 - 28 Juillet, 2011. Briançon. Hautes Alpes. France.
- Time Transfer by Laser Link (**T2L2**). Été 2010. Observatoire de Paris.

MEMBERSHIP

SF2A : Société Française d'Astronomie et d'Astrophysique.
SMF : Société Mathématique de France.
EMS : The European Mathematical Society.
Doc'Up : Association des doctorants de l'UPMC.
EUFR : European Facility For Airborne Research.
AMS : American Mathematical Society.
EGU : European Geosciences Union.

HARDWARE & SOFTWARE

Languages de programmations:
• Fortran, Pascal, UNIX shell scripting, GNU make, IDL, Mathematica, Maxima.
Systèmes d'exploitation:
• Apple OS X, Linux, UNIX variants.
Traîtement d'images:
• IDL, IRAF.
Autres:
• Virtual Observatory tools. $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ ($\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$, $\text{B}_{\text{I}}\text{B}_{\text{T}}\text{E}_{\text{X}}$), Emacs.

HOBBIES

Histoire. Philosophie. Echecs. Tennis. Volleyball. Numismatique. Philatélie.

AUTRES

Reviewer pour Grant Agency of the Czech Republic (GACR) en novembre 2012.
Tutrice dans le cadre de la formation DU (Diplôme Universitaire de l'Observatoire de Paris): en Astronomie & Mécanique Céleste.
Encadrante d'un stage de troisième. Du 25 au 29 Juin, 2012.
Elue à la Commission Consultative des Doctorants Contractuels de l'UPMC.
Guide de l'Observatoire de Meudon, Meudon, France.
Membre du CA de l'association Doc'Up -Association des doctorants du PRES Paris Sorbonne-, UPMC, Paris, France.