

ECOLE DOCTORALE D'ASTRONOMIE D'ILE DE FRANCE

Thèse de Doctorat

en

Dynamique des systèmes gravitationnels

Etude dynamique des satellites proches des planètes et des petites planètes

Présentée par

Frédéric Vachier

Soutenue à l'Observatoire de Paris le 5 juillet 2004, devant le jury composé de :

Bruno Sicardy
Dan Pascu
Michel Rapaport
William Thuillot
Jean-Eudes Arlot
Roberto Vieira-Martins

Président du jury
Rapporteur
Rapporteur
Directeur de thèse
Directeur de thèse
Examineur

Remerciements

Je remercie William Thuillot et Jean-Eudes Arlot pour m'avoir proposé ce sujet de thèse. C'est ainsi qu'à peine installé à l'IMCCE, je me suis retrouvé dans un avion à destination des États-Unis. Ce fut le commencement d'un long périple à travers le monde. Et pendant deux années j'ai pu apprendre à vivre comme un astronome (me coucher tard et me lever tard).

Je remercie les membres de mon jury, qui ont eu la patience de corriger mon manuscrit et surtout de m'assister lors de ma soutenance.

Je remercie Roberto, Dan et Julia, Carliño, Claudia, Pierre et la petite Julie, pour leur accueil chaleureux durant mes séjours à l'étranger.

Je remercie tous les membres de l'IMCCE qui m'ont assisté de près ou de loin dans ma vie et mon travail au sein de l'institut. Tout particulièrement Jérôme, Pascal, S'tro, François, Alain, et Mirel.

Je remercie tout particulièrement Anita pour son soutien depuis mon arrivée à Paris. Vous avez su me mettre en confiance tout au long de ces années.

Je remercie tous mes supporters les plus chers que sont mes amis. De près ou de loin, vous avez su me comprendre, m'aider et me sortir des mes épreuves.

Je remercie ma famille, ma mère, ma soeurette et Faten, car votre patience et vos encouragements ont été sans limite. A mes pépettes Camille, Emma et Ambre car vous me régalez de plaisirs.

Enfin, et non des moindres, mes pensées n'ont de cesse d'aller vers toi, papa.

"Nous devons être assurés, en définitive, que la nature tient en réserve les causes de résurrection comme elle tient dans ses mains les causes de destruction. Pour elle, le temps n'est rien. Un acte qui demande cent mille ans pour s'accomplir est aussi nettement déterminé et formé qu'un acte qui ne demande qu'une minute. Absolument parlant, l'éternité seule existe, et le temps n'est qu'une forme relative."

Camille Flammarion, *Astronomie populaire*.

Vous me direz ceci explique cela, mais pour les personnes qui me connaissent bien, je voulais par cette citation, vous prouver finalement, que pour tout un chacun, le temps n'est qu'une forme relative.

à mes parents,

Table des matières

Introduction	11
I Mouvement des satellites proches de Jupiter	17
1 L'environnement de Jupiter	19
1.1 Introduction	21
1.2 La planète Jupiter	21
1.3 Composition, formation et structure	23
1.3.1 Structure radiale	23
1.3.2 Aspect de la surface de la planète	24
1.3.3 La grande tâche rouge	25
1.4 Le champ de gravité de la planète	25
1.5 Les anneaux	26
1.6 La magnétosphère	27
1.7 Les émissions radio	28
1.8 Les satellites de Jupiter	28
1.8.1 Historique	28
1.8.2 Les satellites galiléens	29
1.8.3 Les satellites internes à l'orbite de Io	32
1.8.4 Les groupes de satellites de Jupiter.	35
1.9 Conclusion	36
2 Les Observations	39
2.1 Introduction	41
2.2 Les observations anciennes	41
2.3 Observations modernes	41
2.3.1 Observations spatiales	42
2.3.2 Observations de I. Kulyk, K. Jockers, N. Karpov et A. Sergeev (1998-2000) [1]	42
2.3.3 Observations de P.D. Nicholson et K. Matthews (1988) [2]	43
2.3.4 Observations de D. Pascu, J. Rohde, F. Vachier (2000-2001)	43
2.3.5 Observations de D. Pascu (1985)	45
2.3.6 Observations de R. Vieira Martins, C. Veiga et F. Vachier (1995-2001)	45
2.3.7 Observations de F. Colas, J. Lecacheux, F. Vachier (2001)	46
2.4 Traitement de l'image et calcul des positions	46
2.4.1 Calibration photométrique	47
2.4.2 Visualisation	48
2.4.3 Pointage	48

2.5	Constitution du catalogue des observations	51
2.6	Conclusion	57
3	Approche numérique du mouvement des satellites	59
3.1	Introduction	61
3.2	Références et Conventions	61
3.2.1	Plan de référence	61
3.2.2	Changement de repères	62
3.2.3	Les changements de repères pour les données observationnelles	62
3.3	Modèle dynamique	65
3.3.1	Conventions du programme	65
3.3.2	La force de perturbation liée à l'aplatissement	65
3.3.3	Expression des équations de la dynamique pour les forces liées au champ de gravitation de la planète	66
3.3.4	Conclusion	74
3.4	Ajustement de l'orbite	74
3.4.1	Equation aux conditions	74
3.4.2	Expression matricielle	74
3.4.3	Moindres carrés	75
3.4.4	Matrice des dérivées partielles	75
3.4.5	Calcul de la matrice A (Forme simplifiée)	76
3.4.6	Le problème général d'un paramètre quelconque	77
3.4.7	Résumé des tâches effectuées par le programme	78
3.5	Calcul de la force de perturbation créée par le champ magnétique de la planète.	79
3.5.1	Energie dissipée	79
3.5.2	Hypothèses	80
3.5.3	Effet sur la dynamique	80
3.5.4	Comparaison avec l'intégration numérique	80
3.6	Extrapolation d'orbites	81
3.6.1	Les équations et les paramètres internes	81
3.6.2	L'algorithme de Bulirsh et Stoer	81
4	Comparaisons : Modèles et Observations	83
4.1	Introduction	85
4.2	Les effets physiques faibles sur le mouvement des satellites	85
4.3	Précisions des algorithmes	86
4.3.1	vitesse de l'algorithme	86
4.3.2	Aller-retour et problème des deux corps	87
4.3.3	Comparaison avec une méthode analytique	88
4.4	Classification des observations	89
4.4.1	Résidus pour les observations du Pic du Midi	90
4.4.2	Résidus pour les observations brésiliennes	91
4.4.3	Résidus pour les observations à Pik Terskol	91
4.4.4	Les observations de Pascu	92
4.4.5	Résidus pour les observations de Flagstaff en 2000 et 2001	92
4.4.6	Conclusion	94
4.5	Construction d'une éphéméride	94
4.6	Comportement des éléments osculateurs des orbites des satellites, perturbées par le J2	95

4.7	Conclusion	97
II	Le mouvement des satellites d'astéroïdes	103
5	Satellites d'astéroïdes	105
5.1	Introduction	107
5.2	Découverte	107
5.3	(22) Kalliope	107
5.4	Les changements de repère	109
5.4.1	Modèle dynamique	110
5.4.2	Les observations	112
5.4.3	L'ajustement	113
5.4.4	Les résultats	114
5.5	Nephtys, Hermione et les autres...	114
	Conclusion	118
III	Annexes	123
A	Bilan statistique des Résidus	125
B	Représentation graphique des OMC	127
B.1	Observations de Thébé	127
B.2	Observations d'Amalthée	143
C	Publications	161
	Bibliographie	164

Introduction

Le sujet principal de cette thèse est l'étude dynamique des petits corps du système solaire. Une première partie consiste en l'analyse du mouvement des satellites proches de la planète Jupiter. La seconde, quant à elle, porte sur les satellites d'astéroïdes.

Les satellites de Jupiter considérés ici, ont la particularité de se mouvoir à l'intérieur de l'orbite de Io. Nous nommerons cette famille de satellites la "famille des satellites internes de Jupiter". Trois des quatre satellites qui la composent, Métis, Adrasteé et Thébé, ont été découverts il y a seulement 25 ans par les sondes Voyager. Amalthée est le plus ancien découvert en 1892 par Edward Emerson Barnard.

Nous allons présenter dans un premier temps l'environnement dans lequel évoluent ces petits satellites, afin d'effectuer un bilan des forces et construire un modèle dynamique. Une grande partie de ma thèse a consisté à recenser les observations de ces satellites faites à travers le monde. J'ai pu également participer à des missions d'observations notamment au Brésil, aux États-unis et au Pic de Midi pour acquérir de nouvelles données. Nous verrons dans le second chapitre l'ensemble des observations recensées de ces satellites.

Pour observer les satellites de planètes puis pour les identifier sur les images, nous devons connaître leur position relative à la planète. Le fait de connaître leur position nécessite de construire un modèle théorique. Ce modèle est basé sur l'environnement du système gravitationnel de la planète. Mathématiquement, il s'écrit par les équations de la dynamique et se résout numériquement, grâce à l'informatique. Il est donc possible d'ajuster ce modèle sur les observations pour obtenir une nouvelle solution du mouvement de ces corps. De cette manière itérative, et cela est généralement le cas pour la plupart des corps célestes, nous obtenons une éphéméride de plus en plus précise.

Je présenterai dans le troisième chapitre l'aspect théorique du modèle dynamique. Après avoir fait le bilan des ensembles d'observations des satellites, je détaillerai la manière dont j'ai construit le modèle dynamique ainsi que la méthode numérique employée pour l'ajustement sur les observations.

Dans le chapitre 4, je discuterai des outils de vérification d'une telle méthode et des ensembles d'observations eux mêmes, en comparant les résidus obtenus. J'expliquerai les différentes étapes qui m'ont permis d'établir une solution "prête à l'emploi" des satellites Amalthée et Thébé. Ainsi, il sera possible par l'intermédiaire du serveur Web de l'IMCCE d'obtenir l'éphéméride de ces corps. La carence en données observationnelles des satellites Adrasteé et Métis montre les limites d'une telle méthode car elle influe sur la stabilité de l'ajustement du modèle, nécessaire au calcul de l'éphéméride.

Un autre système dynamique met en cause un petit satellite proche de son corps central, c'est le cas des satellites d'astéroïdes. Je propose en deuxième partie de cette thèse d'étudier le mouvement d'un de ces corps en prenant pour exemple le satellite Linus de (22) Kalliope.

L'existence de satellites d'astéroïdes était fortement controversée il y a une quinzaine d'années et suscitait de nombreuses polémiques. Mais la première observation directe de ces corps fut le 28 août 1993 lorsque la sonde Galileo, en route vers Jupiter, croisa l'astéroïde (243) Ida. Dactyl est le nom de ce satellite et orbite à une distance d'environ 90 km de (243) Ida. C'est en novembre 1998, avec le télescope Canada France Hawai (CFHT) et son système d'optique adaptative (PUEO) que fut réalisée la première observation directe

depuis la Terre, de "Petit-Prince", le satellite de l'astéroïde (45) Eugenia. Depuis, l'optique adaptative nous a permis de multiplier les observations directes et terrestres de ces satellites.

Le modèle dynamique défini pour les satellites d'astéroïdes est plus simple que pour le cas des satellites de Jupiter puisqu'il est basé sur un problème des deux corps, perturbé éventuellement par la forme du corps central. Mais la difficulté ici, réside en la connaissance des paramètres qui définissent le problème. La masse du corps central doit être déterminée avec une précision de l'ordre de 0.1% (soit 10^{15} kilogrammes) pour (22) Kalliope pour que la période du satellite soit suffisamment bien représentée lorsqu'on compare la position du satellite à l'observation.

Mais les paramètres physiques du corps central restent mal connus en raison de sa taille réduite et de l'incertitude sur sa densité. Ainsi, ces systèmes dynamiques sont des problèmes extrêmement instables du point de vue numérique. Une variation infinitésimale d'un de ces paramètres définissant le problème induit une solution d'orbite complètement différente. Au départ d'une telle étude, aucune valeur numérique n'était connue avec une précision suffisante. Ce n'est qu'en résolvant un tel problème dynamique que nous pourrions affiner nos connaissances des paramètres physiques des corps centraux. En déterminant la masse, les axes de rotation du primaire, sa forme, nous pourrions en déduire sa densité, nous pourrions les classer et finalement connaître leur passé.

Première partie

Mouvement des satellites proches de
Jupiter

Chapitre 1

L'environnement de Jupiter



1.1 Introduction

Avant de commencer l'étude du mouvement des satellites de Jupiter, il est important de comprendre l'environnement quasi en vase clos dans lequel ils évoluent.

La force principale que subissent les satellites internes est l'attraction gravitationnelle Jovienne. Le but de ce premier chapitre est de faire un bilan de nos connaissances sur la physique de Jupiter.

Prenons deux corps de masse ponctuelle, le mouvement d'un corps par rapport à l'autre décrit une orbite dite képlérienne. Tout écart à cette orbite peut être considéré comme la conséquence d'une force perturbatrice ajoutée au modèle dynamique. Or, la sphéricité de Jupiter n'est pas parfaite, ce qui implique des corrections dans les paramètres orbitaux.

Le premier terme de non sphéricité de la planète s'exprime numériquement par le coefficient zonal J_2 et exprime l'aplatissement aux pôles de la planète et le bourrelet équatorial. Les termes suivants (J_3 , J_4 , ...) expriment des dissymétries dans la forme de la planète. Les satellites sont d'autant plus sensibles à la forme de la planète qu'ils en sont proches.

Jupiter a une autre particularité. Autour d'elle tournent les plus gros satellites du système solaire. Ils ont été découverts par Galilée. C'est pourquoi on les nomme les satellites galiléens. Ils attirent, par leur masse, tous les satellites de Jupiter. D'autres corps extérieurs à l'environnement jovien perturbent de manière analogue les satellites de Jupiter. Ces corps sont le Soleil et les autres planètes du système solaire. Nous considérons seulement des perturbations liées à la présence du Soleil et de Saturne. Ils sont extrêmement massifs mais la perturbation gravitationnelle provoquée reste faible.

Bien évidemment les autres planètes jouent aussi un rôle, mais leur influence est encore plus faible. Il sera intéressant par la suite de discuter du choix d'une limite à prendre dans le bilan des forces appliquées aux satellites.

Les quatre satellites internes Thébé, Amalthée, Métis et Adrastée participent à un échange de particules dans la zone où ils évoluent entre Io et les anneaux de Jupiter. Ce qui nous permet de nous interroger sur l'existence et la naissance de ces satellites.

Nous verrons en fin de chapitre les différentes familles de satellites de Jupiter découvertes à ce jour.

1.2 La planète Jupiter

Jupiter, dont le nom est issu de Jove (Zeus en grec, le Dieu des Dieux, maître de l'Olympe), appartient au groupe des planètes géantes et gazeuses du système solaire, avec Saturne, Uranus et Neptune. En comparaison avec la Terre, sa masse et son rayon sont respectivement environ 318 fois et 11 fois plus élevés (cf. paramètres ci-dessous), ce qui en fait la planète la plus grosse et la plus massive du système solaire. Sa densité est faible et elle ne possède pas de surface solide. Il s'agit d'une sphère d'hydrogène et d'hélium avec un noyau constitué de fer et de silicates, de méthane et d'hydrocarbures, d'ammoniac et probablement de glace d'eau. Sa rotation très rapide engendre un aplatissement polaire considérable et contribue aux mouvements des masses gazeuses, de compositions chimiques et d'altitudes différentes, qui constituent l'aspect découpé en bandes colorées parallèles à l'équateur.



FIG. 1.1: Jupiter et un de ses satellites vus par la sonde Galileo.

Paramètres orbitaux [3]

Diamètre :	142 984 km
Distance moyenne au Soleil :	$778,3 \cdot 10^6$ km
Excentricité :	0,0482
Période de révolution sidérale :	11,86 années
Période de rotation sidérale :	9h84
Distance à l'aphélie :	$815,7 \cdot 10^6$ km
Distance au périhélie :	$740,9 \cdot 10^6$ km
Inclinaison du plan de l'orbite sur écliptique :	1,308 degrés
Vitesse orbitale moyenne :	13,06 km/s

Paramètres physiques [3]

Masse :	$1,899 \cdot 10^{27}$ kg
Température moyenne de surface :	$-2,981^{\circ}C$
Température maximum de surface :	$11,928^{\circ}C$
Température minimum de surface :	$-130^{\circ}C$ (Grande Tache Rouge)
Densité moyenne :	1,33 (Terre : 5.52)
Champ magnétique équatorial de surface :	4.104 Tesla
Composition principale :	H et He

Jupiter possède une magnétosphère et une ionosphère. Elle est accompagnée d'anneaux ainsi que d'un système de satellites. Depuis la première observation avec un instrument optique par Galilée en 1610, plusieurs sondes spatiales ont pu s'approcher de Jupiter pour étudier sa structure et sa composition. Pioneer-10 (décembre 1973), Pioneer-11 (décembre 1974), Voyager-1 (mars 1979), Voyager-2 (juillet 1979), Ulysses (février 1995) et Galileo (1995). Le système planétaire de Jupiter est si complexe qu'il aura fallu 400 ans pour que l'on commence à comprendre les caractéristiques principales qui le composent.

Dans l'étude sur la dynamique des satellites proches que je présente dans cette thèse, j'essaie de prendre en compte un grand nombre de forces qui régissent l'environnement de la planète. Cela me permet de classifier l'amplitude de ces forces au voisinage proche de la

planète et de dégager un modèle simple et précis ajusté sur les observations, puis de fournir une solution numérique. Je décris dans les sections suivantes les informations principales du système jovien. Certaines comme la forme de la planète ou la présence des autres satellites, agissent directement sur le mouvement des satellites proches, d'autres sont plus indirectes comme la magnétosphère ou les anneaux. Enfin, des parties sur la grande tache rouge, ou les émissions radio, donnent une vision plus large sur les phénomènes observables.

1.3 Composition, formation et structure

Les molécules gazeuses qui devraient s'échapper de la planète en conséquence du mouvement brownien¹, phénomène que l'on observe notamment pour les planètes telluriques où la température des couches externes de l'atmosphère est plus élevée, ne peuvent quitter la forte attraction jovienne. Ainsi, cette composition doit être très voisine de celle de la nébuleuse solaire primitive qui a engendré le système solaire.

Cette invariance supposée de la composition de Jupiter est une formidable source d'information quant à l'évolution de l'Univers. Par exemple, la mesure de l'abondance en hélium, en hydrogène ou en deutérium au sein de la planète donne des valeurs de la composition du milieu interstellaire local d'il y a 4,5 milliards d'années, ce qui peut contraindre de nombreux modèles astrophysiques.

Jupiter est le siège d'une très forte activité atmosphérique dont on peut suivre l'évolution quotidienne. De forts vents circulent selon leur altitude et leur latitude, d'est en ouest ou d'ouest en est, et peuvent atteindre jusqu'à 130m.s^{-1} près de l'équateur. De l'extérieur, on distingue approximativement quatre couleurs : roux, rouge, gris-bleu et marron, qui correspondent à différentes compositions chimiques, températures et pressions, mais aussi différentes altitudes. On classe ainsi les nuages dans quatre groupes, qui décrivent l'abondance de nuages, tourbillons ovales, cyclones et autres turbulences qui ébranlent l'atmosphère jovienne.

Jupiter est principalement constituée d'hydrogène (82%) et d'hélium (18%). On a observé également du méthane (0,0007%), de l'éthane (0,0004%), de l'ammoniac (0,0002%), de l'acétylène (0,0001%), ainsi que des traces d'hydrosulfide d'ammonium, de benzène et de méthylacétylène.

1.3.1 Structure radiale

Les images de Jupiter, prises de l'extérieur de son atmosphère, ne révèlent que les hautes couches gazeuses. Cependant, on peut déduire des informations sur la structure de Jupiter en étudiant notamment les rayonnements électromagnétiques émis et réfléchis (on sait d'ailleurs que Jupiter émet plus d'énergie -70%- qu'elle n'en reçoit du Soleil, ce qui implique la présence d'une source interne d'énergie, démontrée par les mesures radiométriques infrarouges).

Galiléo a envoyé un module scientifique plongeant au coeur de la planète géante analysant la pression, la température, les nuages et la composition de son atmosphère. Le module principal, quant à lui, a continué à voyager autour de Jupiter et des ses quatre principaux satellites, dits galiléens : Io, Europe, Ganymède et Callisto.

On distingue trois couches : le noyau jusqu'à $0,2 R_j^2$, entre $0,2$ et $0,8 R_j$ une zone où l'hydrogène est métallique, et au delà un mélange d'hydrogène et d'hélium moléculaires. On schématise la coupe radiale de Jupiter par la figure 1.2.

¹agitation propre des molécules, fonction de la température et de la pression

² R_j = rayon jovien

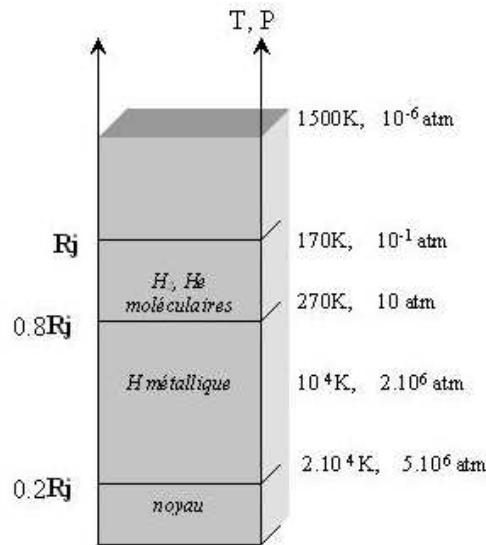


FIG. 1.2: Description des strates de l'atmosphère de Jupiter.

1.3.2 Aspect de la surface de la planète

Jupiter présente une forte symétrie axiale, alternance de bandes brillantes et sombres que l'on désigne par convention respectivement zones et ceintures (ou bandes), qui, au cours du temps conservent une relative mais surprenante stabilité. Les divisions ne sont pas si nettes qu'on le pensait, la planète semble recouverte d'un manteau supérieur de cirrus blancs. Les zones sont plus élevées et plus froides que les ceintures, elles sont le siège de vents ascendants anticycloniques qui rencontrent à leur sommet des nuages blancs d'ammoniac. En revanche, les bandes correspondent à des vents descendants cycloniques. L'association de ces mouvements descendants et ascendants correspond à une convection globale générée par l'activité thermique interne de la planète.

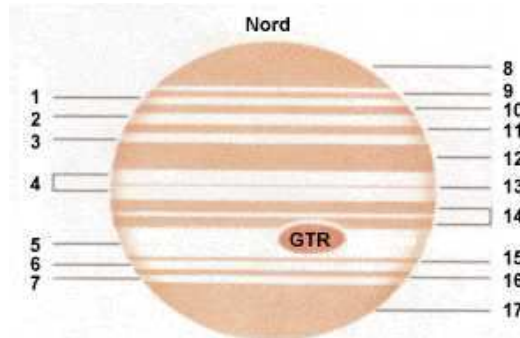


FIG. 1.3: Description des bandes à la surface de Jupiter.

Légendes de la figure 1.3.

1	- zone tempérée nord-nord	10	- ceinture tempérée nord-nord
2	- zone tempérée nord	11	- ceinture tempérée nord
3	- zone tropicale nord	12	- ceinture équatoriale nord
4	- zone équatoriale	13	- ceinture équatoriale
5	- zone tropicale sud	14	- ceinture équatoriale sud
6	- zone tempérée sud	15	- ceinture tempérée sud
7	- zone tempérée sud-sud	16	- ceinture tempérée sud-sud
8	- région polaire nord	17	- région polaire sud
9	- ceinture tempérée nord-nord-nord	GTR	- Grande Tâche Rouge

1.3.3 La grande tâche rouge

Enigme depuis sa découverte en 1664 par l'astronome anglais Robert Hooke ou par Cassini selon certains, la fameuse Grande Tâche Rouge constitue la structure la plus spectaculaire de l'atmosphère de Jupiter. Il s'agit d'un cyclone froid ovale d'environ 25 000 kilomètres de long et 12 000 km de large qui semble s'affaiblir et diminuer de 100 km par an. Elle est généralement interprétée comme une conséquence d'un phénomène météorologique provenant des couches supérieures de l'atmosphère. De nombreux modèles coexistent pour expliquer son existence, mais il subsiste des incertitudes liées notamment à sa persistance et son altitude où se situent normalement les nuages blancs.

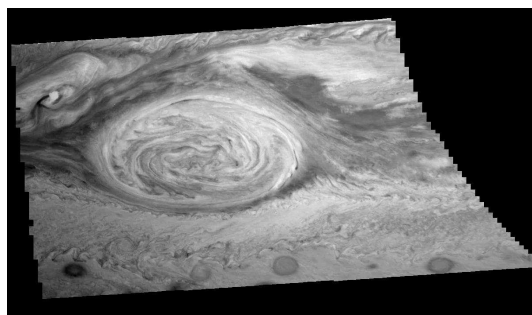


FIG. 1.4: Grande tache Rouge de Jupiter prise par la sonde Galileo.

1.4 Le champ de gravité de la planète

Du fait que nous ne considérons pas la planète Jupiter comme une sphère parfaitement homogène, il nous faut connaître les caractéristiques du champ de gravité de la planète. Les observations de la mission Galileo ont permis d'améliorer cette connaissance du champ de gravité (Jacobson,[4]). Les harmoniques du champ de gravitation ont pu être déterminées par un ajustement sur les données observationnelles de la sonde ainsi que sur les observations terrestres obtenues entre 1967 et 2001 (astrométrie, éclipses mutuelles, et éclipses par Jupiter). Parmi les observations spatiales il y a l'interférométrie à très longue base, l'analyse Doppler, les occultations radio, les images issues de la navigation des sondes Pioneer 10/11, Voyager 1/2, Ulysses, Galileo et Cassini. Ainsi les principales constantes du système gravitationnel Jovien ont pu être réévaluées depuis Campbell and Synnott [5]. Les valeurs suivantes des constantes du système gravitationnel Jovien sont issues de Jacobson (2001, [4]).

Les masses gravitationnelles des principaux corps sont : [6]

Système Jovien	=	126712767.	$\pm 5km^3s^{-2}$	$1.00020707 M_{Jupiter}$
Io	=	5959.7	$\pm .5km^3s^{-2}$	$4.705 \cdot 10^{-5} M_{Jupiter}$
Europe	=	3202.72	$\pm .05km^3s^{-2}$	$2.527 \cdot 10^{-5} M_{Jupiter}$
Ganymède	=	9887.86	$\pm .05km^3s^{-2}$	$7.804 \cdot 10^{-5} M_{Jupiter}$
Callisto	=	7179.25	$\pm .05km^3s^{-2}$	$5.668 \cdot 10^{-5} M_{Jupiter}$

Les coefficients harmoniques zonaux sont :

J2	=	0.0147350	$\pm 4.10^{-7}$
J3	=	0.0000002	
J4	=	-0.0005888	$\pm 5.10^{-7}$
J6	=	0.0000278	$\pm 2.5.10^{-7}$

Les coordonnées équatoriales du pôle nord de Jupiter à l'époque J2000 (ICRF) sont :

Ascension droite	α_{PNJ}	=	268.0573 deg	± 0.0005 deg
Déclinaison	δ_{PNJ}	=	64.4958 deg	± 0.0005 deg

1.5 Les anneaux

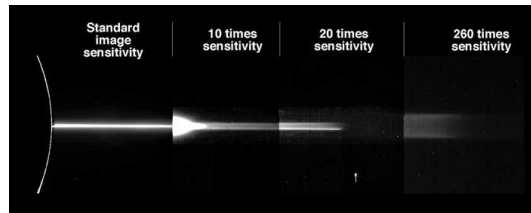


FIG. 1.5: Les anneaux de Jupiter vus par la sonde Galileo.

Les anneaux de Jupiter n'ont été découverts que le 4 mars 1979, par la sonde Voyager-1. Ils n'avaient pu être observés auparavant car leur densité est environ un milliard de fois plus faible que ceux de Saturne. De plus, possédant un faible albédo (environ 0,05) et étant très proches du disque brillant de la planète, ils sont difficilement détectables pour un observateur terrestre. Toutefois, le 9 mars 1979, des observations terrestres dans l'infrarouge (2.2 micromètres, longueur d'onde où la lumière solaire est fortement absorbée par la haute atmosphère de Jupiter riche en méthane), ont confirmé l'existence de ces anneaux.

Il s'agit de trois anneaux concentriques tournant autour de Jupiter à des distances comprises entre 90000 km et 250000 km. L'anneau principal, d'une largeur d'environ 6000 km, possède un bord extérieur de 800 km très brillant.

Etant très proches de la planète, les anneaux sont soumis aux résistances atmosphériques et magnétiques joviennes. Leur persistance suggère donc un mécanisme d'alimentation. La mission Galileo a fourni des informations quant à leur composition. Ils s'agirait principalement de poussières et de particules arrachées par des météorites à la surface des satellites internes de Jupiter, Adrasteé, Métis, Amalthée et Thébé.

1.6 La magnétosphère

L'association des informations recueillies depuis les années 50 par les radiotélescopes et celles fournies par les différentes sondes qui ont approché Jupiter nous permet aujourd'hui de connaître relativement bien son champ magnétique. Le champ magnétique jovien est beaucoup plus intense que sur Terre. On peut le modéliser en première approximation par un dipôle, dont le moment est 150 fois plus élevé que le dipôle terrestre. L'axe magnétique est incliné de 11 degrés par rapport à l'axe de rotation de la planète, il est décalé d'environ 7000 km du centre géométrique. A cause de ces particularités, le champ n'est pas uniforme et peu symétrique, on observe notamment une différence entre les hémisphères nord et sud.

La densité du vent solaire au niveau de l'orbite de Jupiter (5,2 UA) est 25 fois moindre qu'à une unité astronomique du Soleil. La magnétosphère jovienne, ainsi soumise à une pression cinétique du vent solaire plus faible, peut s'étendre et ainsi occuper un volume cent fois plus grand que celui de la magnétosphère terrestre.

Selon les fluctuations de l'activité solaire, la queue peut atteindre l'orbite de Saturne, ce qui lui confère une distance de plus de 600 millions de kilomètres. Aux pôles, où le champ est vingt fois plus intense que sur Terre, on observe de magnifiques aurores, de nature analogue aux aurores polaires terrestres.

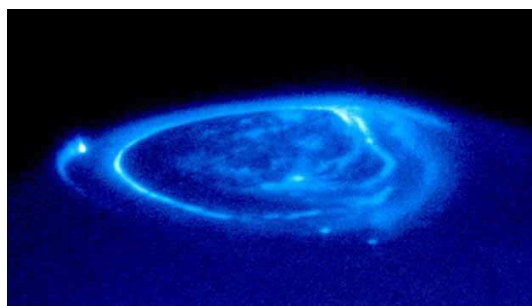


FIG. 1.6: Aurore au pôle de Jupiter vue par le satellite Hubble.

La forme de cette magnétosphère provient également de la vitesse de rotation et de la masse élevée de la planète. Les particules électriquement chargées de la partie interne de la magnétosphère jovienne subissent une forte force centrifuge, qui les amène à se concentrer dans le plan équatorial, tout en s'éloignant et en suivant les lignes de force du champ magnétique. Ainsi, on observe un disque de plasma que parcourent des courants électriques intenses, susceptibles d'interagir avec la magnétosphère. La forme de ce disque est particulière, puisqu'à son extrémité intérieure, il coïncide avec le plan équatorial magnétique, et qu'à partir d'environ 5 rayons joviens, il se fond dans le plan équatorial de la planète.

L'activité magnétique de Jupiter est liée également à la présence de ses satellites. Si sur Terre la source prépondérante de particules chargées approchant la planète est solaire, les ions et les électrons de la magnétosphère jovienne proviennent en grande partie de Io, probablement le corps solide le plus actif du système solaire, avec une activité volcanique intense. Les gaz et poussières expulsés lors des éruptions s'échappent du champ de gravité de Io. Ces particules subissent une ionisation due au rayonnement UV solaire et engendrent, par la révolution du satellite, un tore de plasma autour de Jupiter, coïncidant avec l'orbite de Io. Ce tore interagit électriquement avec l'ionosphère jovienne. Dans cette configuration particulière, Jupiter agit comme un accélérateur de particules. On observe de grandes énergies dans la magnétosphère, ainsi que des rayons cosmiques de moyenne énergie.

1.7 Les émissions radio

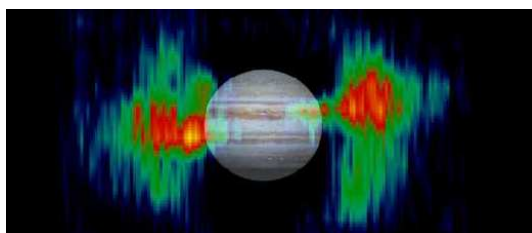


FIG. 1.7: Ceinture de radiation autour de Jupiter observée par la sonde Cassini. Ces émissions radio proviennent des électrons à haute énergie se déplaçant à des vitesses proches de celle de la lumière.

Issus de la magnétosphère interne, les rayonnements joviens permettent de mieux comprendre sa structure. Jupiter émet dans plusieurs domaines de longueur d'onde :

Millimétrique et centimétrique :

Dominé par le rayonnement thermique des nuages.

Décimétrique :

Dû à l'émission synchrotron d'électrons relativistes de très grande énergie, piégés dans une ceinture de radiation intense, découverte par la sonde Galileo, entre les anneaux de Jupiter et les couches supérieures de l'atmosphère, par un mécanisme analogue aux ceintures de Van Allen terrestres.

Décamétrique, hectométrique :

Émission irrégulière avec des sursauts de durées variables (entre 10^{-3} et 10^2 secondes), sous forme d'orages de plusieurs heures, selon les positions de Jupiter et de Io. Dans le domaine décamétrique, le rayonnement jovien est plus intense que celui du soleil.

Kilométrique :

Émission dont on envisage deux sources. L'une située à des latitudes élevées, proche la planète, l'autre dans le tore de plasma engendré par Io.

1.8 Les satellites de Jupiter

1.8.1 Historique

En 1610, grâce à sa lunette astronomique, Galilée observe le mouvement des quatre plus gros satellites de Jupiter. Cette découverte, qui favorisa largement l'acceptation de l'héliocentrisme de Copernic, fut la première d'une série d'observations de plus en plus fructueuses avec l'amélioration et la modernisation des techniques. La première grande découverte issue de l'observation des satellites galiléens fut réalisée en 1676, par Olaus Römer. Elle établit que la lumière a une vitesse finie. Au 17ème siècle, les premières publications des éphémérides de ces satellites constituaient une référence fiable pour déterminer le temps et donc utile pour la mesure des longitudes sur Terre. La mesure des longitudes étant équivalente à la détermination du temps, le mouvement des satellites joviens pouvait servir d'horloge, consultable simultanément par chaque observateur terrestre.

On a observé à ce jour 63 petits corps orbitant autour de Jupiter. La table 1.3 en fin de chapitre, recense l'ensemble de ces satellites avec leur désignation U.A.I.³, leur distance moyenne, leur date de découverte, et les observateurs.

1.8.2 Les satellites galiléens

Il s'agit de quatre corps de rayons voisins de 2000 km, gravitant sur des orbites quasi-circulaires et équatoriales en première approximation. Ces objets peuvent être considérés comme des planètes, d'un point de vue géologique. Ils sont dépourvus d'atmosphère dense et leurs températures de surface sont de l'ordre de 100 Kelvin. Voyager et Galileo les ont approchés, jusqu'à obtenir une résolution d'une dizaine de kilomètres. Les sondes spatiales ont pu ainsi fournir des informations directes quant à leurs compositions et leurs structures.

Nom du satellite	Io (J1)	Europe (J2)	Ganymède (J3)	Callisto (J4)
Découverte par	Galilée	Galilée	Galilée	Galilée
Date de découverte	1610	1610	1610	1610
Masse (kg)	8.9329e+22	4.7978e+22	14.8167e+22	10.7613e+22
Rayon (km)	1821.3 ± 0.2	1565. ± 8	2634. ± 10	2403. ± 5
Masse volumique (g/cm^3)	3,55	3.01	1,93	1,85
Dist. moy. de Jupiter (km)	421,800	671,100	1,070,400	1,882,700
Dist. moy. de Jupiter (R_J)	5.90	9.39	14.97	26.34
Periode sidérale (jour)	1.769138	3.551181	7.154553	16.689018
Excentricité	0.004	0.009	0.002	0.007
Inclinaison (degrés)	0.02/0.04	0.42/0.51	0.06/0.30	0.15/0.74
Albedo	0,61	0.64	0,43	0,20
Magnitude visuelle	5.0	5.3	4.6	5.7

TAB. 1.1: Paramètres orbitaux des satellites Galiléens.

Io



FIG. 1.8: Io vue par la sonde Galileo.

Io constitue l'objet solide le plus actif du système solaire. Son intense activité volcanique, phénomène que l'on pensait réservé à la Terre, est entretenue par la forte gravité

³Union Astronomique Internationale

jovienne. Sa surface est très jeune (moins de 10 millions d'années) et montre de nombreuses caldeiras, cratères, fissures et coulées, mais aucun cratère d'impact. Des montagnes peuvent atteindre 9 km de hauteur.

Les laves recouvrent la surface avec un taux moyen d'environ 10 cm tous les mille ans. On estime à 10 000 tonnes par seconde et par volcan le taux moyen d'expulsion de matière lors des éruptions. Les projections s'élèvent en panaches pouvant atteindre 200 km d'altitude. La surface de Io est régulièrement recouverte par un dépôt d'environ 1 cm tous les mille ans. En surface, alors que la température atmosphérique est de l'ordre de 100K, on observe des zones chaudes d'environ 300 K, correspondant aux points d'émission des vapeurs et autres composés soufrés, notamment du dioxyde de soufre. Ces gaz volcaniques constituent l'atmosphère ténue de Io, sa pression est un million de fois moindre que sur la Terre. Des particules s'échappent relativement régulièrement de cette atmosphère, au rythme moyen d'environ une tonne par seconde, et engendrent un tore de particules ionisées, par la magnétosphère jovienne, coïncidant avec l'orbite de Io.

L'énergie de ce volcanisme très actif provient de l'association des fortes forces de marées exercées par Jupiter et des influences de Ganymède et Europe. La résonance 1/2/4 des trois satellites engendre une oscillation de la trajectoire de Io autour de son orbite et fait varier sa vitesse. Ceci entraîne une variabilité périodique des forces de marées, que subit la surface de Io, responsable des frictions internes, elles-mêmes sources de volcanisme.

Europe

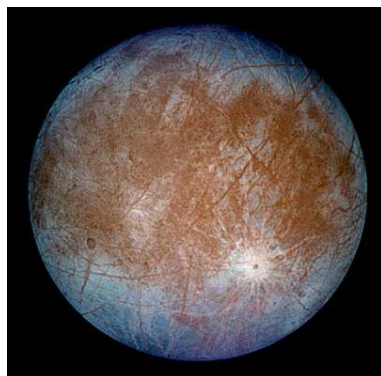


FIG. 1.9: Europe vue par la sonde Galileo.

Europe est brillante et présente un aspect lisse et clair. Sa surface, constituée principalement de glace presque pure est parcourue par des lignes plus sombres, rectilignes ou courbes, qui atteignent jusqu'à 3000 km de longueur et 15 km de largeur. Ces lignes correspondraient à des fissures dans la croûte de glace, probablement causées par des effets de marées exercés par Jupiter. L'absence de cratères d'impact, qui caractérise une surface jeune, est due au renouvellement de la couche d'eau superficielle. De l'eau chauffée par l'activité du noyau silicaté du satellite (radioactivité naturelle, marées), provenant de la base de la croûte, remonte par des fissures et recouvre la surface d'un manteau lisse.

Ganymède

Ganymède est le satellite le plus grand du système solaire, avec 5 268 km de diamètre (Il est plus grand que Mercure et Pluton). La surface de Ganymède est composée de deux



FIG. 1.10: Ganymède vue par la sonde Galileo.

types de terrains. Il s'agit d'une géologie complexe, où sont adjacentes des zones sombres ou regio, approximativement polygonales et riches en cratères, et des zones claires ou sulcus en forme de bandes. Les regios, semblables à la surface de Callisto, sont âgées d'environ 4 milliards d'années et témoignent d'une surface primitive de faible viscosité. Les structures polygonales, appelées furrows, sont encore énigmatiques puisqu'on ne sait pas expliquer leur géométrie ni leur morphologie. Les sulcus ont environ 3,5 milliards d'années, ils sont constitués de glace presque pure, et recouvrent partiellement certaines zones sombres. Il s'agit d'une juxtaposition de sillons (jusqu'à 10 km de largeur pour 400 m de profondeur) et de crêtes. On suppose que les regios correspondent à des régions où s'épanche de l'eau chaude ammoniacquée provenant de sous les sulcus. Cependant, cette structure, qui ressemble à celle de Miranda (satellite d'Uranus) et Encelade (satellite de Saturne), est encore incomprise.

Callisto



FIG. 1.11: Callisto vue par la sonde Galileo.

Callisto est le deuxième plus grand satellite de Jupiter. Son orbite se situe juste au delà de la principale ceinture de radiation jovienne. Son atmosphère très ténue est principalement constituée de dioxyde de carbone (récemment, le télescope Spatial Hubble y a détecté de l'ozone). La surface de Callisto est sombre et saturée de cratères d'impact, dont la morphologie est très amortie. Les diamètres de ces cratères peuvent atteindre 100 km et

le relief subit une importante relaxation visqueuse. L'absence de cratères de grande taille suggère une viscosité primitive faible, l'âge de la surface étant estimé à 4.1 milliards d'années. On observe huit structures à anneaux multiples dont les plus connues sont Valhalla (3000 km de diamètre) et Asgard (1600 km de diamètre).

1.8.3 Les satellites internes à l'orbite de Io

Les satellites internes de Jupiter sont des petits corps non sphériques, dont les dimensions sont de l'ordre de 50 km. Les demi grands axes de leurs orbites, quasi circulaires et équatoriales, sont compris entre 1.79 et 3.11 R_J. Amalthée, détecté depuis plus longtemps, est connue avec un peu plus de précision que Métis, Thébé et Adrasteé. Les informations sur les paramètres physiques commencent à être mieux connues grâce à la sonde Galileo qui a croisé l'orbite d'Amalthée. Les trois derniers satellites ont été découverts lors du passage de la sonde Voyager à proximité de la planète en 1979. Nous avons donc 25 ans d'observations de ces satellites. Mais la proximité de ces satellites avec la planète Jupiter rend le problème observationnel très difficile.

Nom du satellite	Métis (J16)	Adrasteé (J15)	Amalthée (J5)	Thébé (J14)
Découverte par	E. Danielson & D. Jewitt		E. E. Barnard	S. Synnott
Date de découverte	1979	1979	1892	1979
Masse (kg)	9.56e+16	1.91e+16	7.17e+18	7.77e+17
Rayon (km)	20	12.5x10x7.5	135x84x75	55x45
Masse volumique (g/cm^3)	2.8	4.5	1.8	1.5
Dist. moy. de Jupiter (km)	127,969	128,971	181,995*	222,400*
Periode sidérale (jour)	0.295	0.298	0.498179*	0.674536*
Excentricité	≤ 0.005	≤ 0.005	0.003*	0.0177*
Inclinaison (degrés)	≤ 0.1	≤ 0.3	0.37*	1.07*
Albedo	0.05	0.05	0.05	0.05
Magnitude visuelle	17.5	19.1	14.1	15.7

TAB. 1.2: Paramètres orbitaux des satellites proches. Les valeurs indiquées par des étoiles ont été redéterminées dans le présent travail par les résultats de l'intégration numérique. Les valeurs d'inclinaison sont déterminées à partir du plan de l'équateur de la planète.

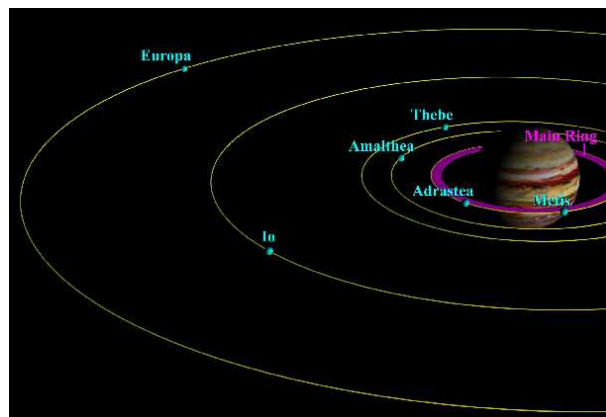


FIG. 1.12: Figure représentant le système interne de Jupiter avec ses anneaux, la famille des satellites interne et les Galiléens.

Amalthée

C'est le 9 septembre 1892 que l'astronome américain Edward Emerson Barnard découvre un cinquième satellite de Jupiter, après les quatre galiléens, l'observant une nuit par semaine pendant deux mois. Cette observation effectuée à l'Observatoire de Lick avec le télescope de 36 inches (91 cm) constitue la dernière découverte visuelle d'un objet du système solaire. Les autres corps, détectés depuis, ont nécessité d'autres techniques : photographie, détecteurs CCD et sondes spatiales.

Ce petit corps de $7,17 \cdot 10^{18}$ kg en orbite très proche de Jupiter évolue sur une orbite dont le demi-grand-axe est 2.54 Rj. Sa distance moyenne à Jupiter est de 181 300 km, au cours d'une révolution synchrone où sa période orbitale et sa période de révolution sont de 0.498179 jours. Sa vitesse orbitale moyenne est de 26.47 km s^{-1} pour une excentricité de 0.003 et une inclinaison de 0.37 deg.

Sa densité est d'environ 1.8 g cm^{-3} et son albédo de 0.05. Sa surface est sombre et il s'agit probablement de l'objet le plus rouge du système solaire. On suppose que le rougissement est dû à la présence d'une couche superficielle de matière en provenance de Io, éjectée lors de ses éruptions volcaniques (micrométéorites, oxygène, composés soufrés et sodium). On observe d'autres reflets de couleur verte dont la nature est aujourd'hui inconnue. La magnitude visuelle d'Amalthée est 14.1.

Ses dimensions, très irrégulières, sont approximativement 270x168x150 km. Sa surface est fortement marquée par les impacts météoritiques. On observe de nombreux cratères dont le plus grand, nommé Pan, mesure 100 km de diamètre pour 8 km de profondeur. Gaea, un cratère de 80 km de diamètre, possède quant à lui une profondeur d'environ 15 km. On a identifié deux montagnes sur Amalthée, les monts Lyctas et Ida, qui ont des hauteurs de 20 km. Ce relief irrégulier traduit le bombardement intense que subit Amalthée. De plus, il est fortement exposée au champ de radiation de Jupiter, elle reçoit continuellement des particules ionisées, protons et électrons de la magnétosphère jovienne.

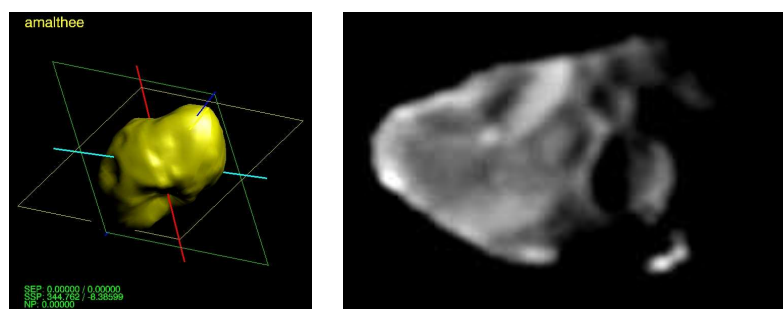


FIG. 1.13: A gauche, modèle tri-dimensionnel d'Amalthée créé à partir des observations par la sonde Galileo (à droite).

Amalthée est, dans la mythologie grecque, la nymphe qui nourrit Jupiter au lait de chèvre pendant son enfance. L'attribution de ce nom est heureuse puisque antérieure à l'hypothèse selon laquelle Amalthée et les autres satellites internes alimentent les anneaux de Jupiter, par un mécanisme d'arrachement de matière.

Thébé

J'ai observé Thébé et Amalthée sur le télescope de 1 mètre au Pic du Midi ainsi qu'à l'observatoire Naval de Flagstaff aux Etats-Unis. Au Pic du Midi, l'observation est délicate

avec une caméra CCD classique mais il est néanmoins possible, avec un temps très clair et quelques étoiles de références bien placées, de faire une astrométrie correcte.



FIG. 1.14: Thébé vue par la sonde Galileo.

Les dimensions du satellite ne dépassent pas les 110 kilomètres de diamètre et il orbite (de la même façon qu'Amalthée) de manière synchrone⁴ autour de Jupiter. La surface de Thébé présente, comme Amalthée, des cratères importants en comparaison de la petite taille du satellite. Thébé est dans la mythologie une nymphe, fille du dieu rivière Asopus.

Métis et Adrastée

Nous avons observé Métis sur le télescope de 1.5 mètres de l'observatoire américain à Flagstaff avec une caméra infrarouge. Nous avons pu voir très distinctement les anneaux de Jupiter dans lesquels évoluent Adrastée et Métis (Fig 2.1). En revanche, peu d'observations de ces satellites ont été faites durant ces 25 dernières années. Seuls des télescopes de classe supérieure à 2 mètres sont capables d'observer Adrastée jusqu'à la magnitude 18.9, noyé dans l'éclat de la planète.

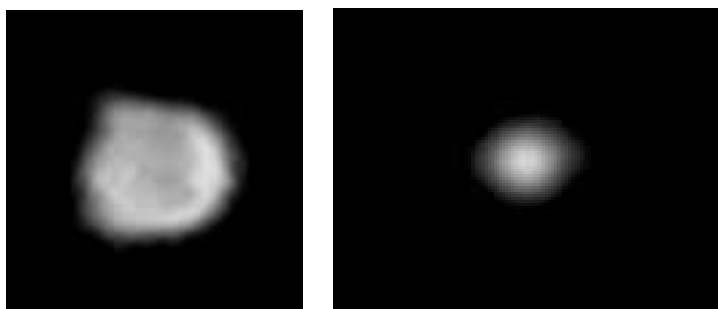


FIG. 1.15: Métis (à gauche) et Adrastée (à droite) vus par le Solid State Imager, instrument de la sonde Galileo.

Métis est le satellite jovien connu le plus interne. Il évolue, avec Adrastée, à l'intérieur de l'anneau principal de Jupiter à 1.81 R_j et pourrait participer au mécanisme de son alimentation. Ses dimensions sont très irrégulières et il est de couleur rouge.

Dans la mythologie grecque, Adrastée, mère de Jupiter et Ananke, accorde les récompenses et choisit les pénitences. Première épouse de Zeus, Mère d'Athéna, Métis, fille d'Océan et de Thétys, est la personnification de la sagesse.

⁴Ses périodes de rotation et de révolution sont identiques.

1.8.4 Les groupes de satellites de Jupiter.

Les satellites de Jupiter sont regroupés par famille d'orbite en fonction de l'éloignement de la planète et leur sens de rotation. Dans les tables 1.3 et 1.4, je donne à titre indicatif les distances moyennes en rayon de la planète de chaque satellite découvert jusqu'à aujourd'hui. La figure 1.16 rend compte de l'étendue du système planétaire jovien.

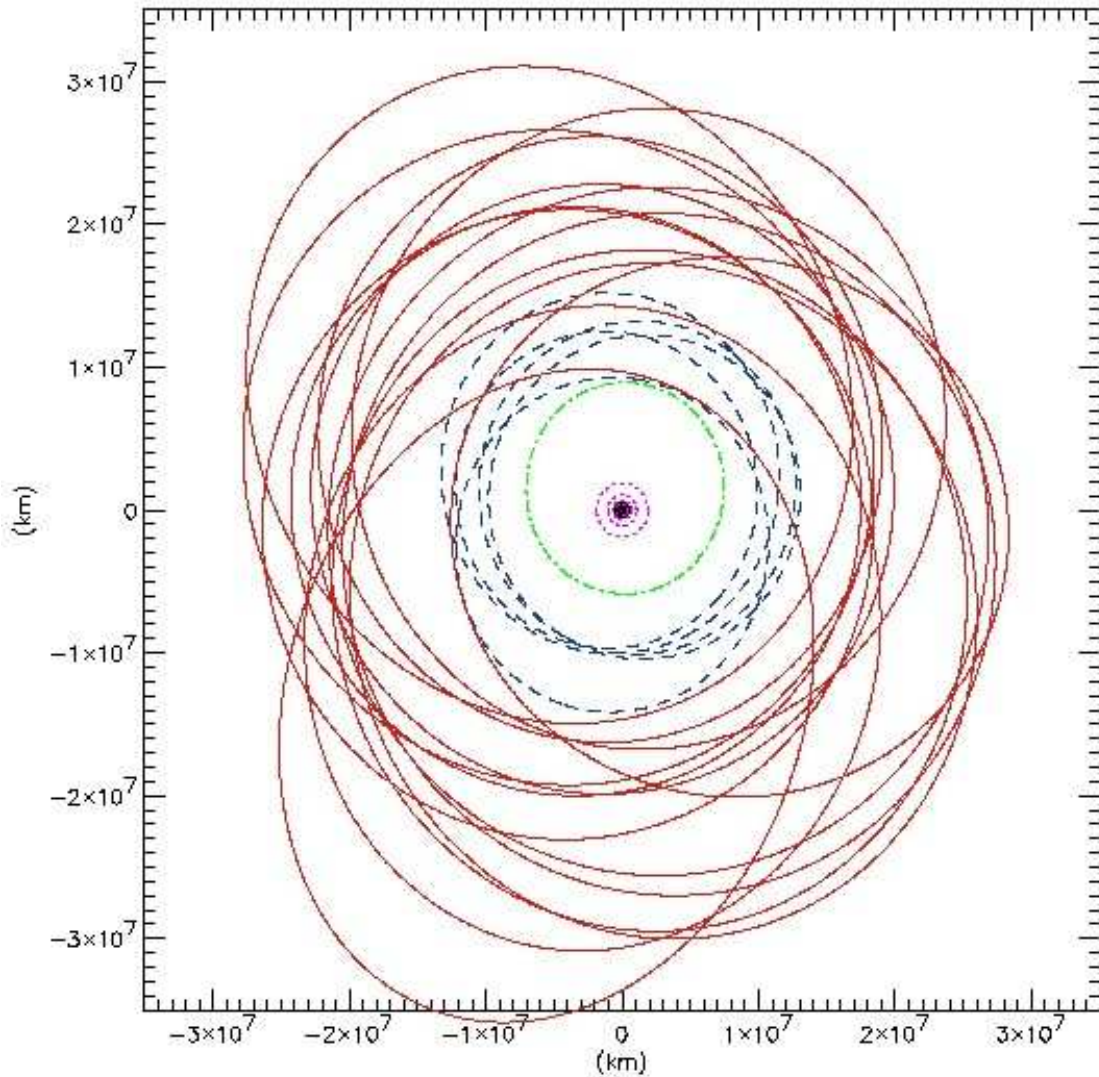


FIG. 1.16: Figure représentant les différentes familles de satellites de Jupiter. Au centre se trouve la planète, ensuite du plus proche au plus éloigné on trouve le groupe des satellites internes (noir), le groupe de Galiléens (violet), le groupe Thémiste (vert), le groupe Himalia (bleu), les groupes Ananke, Carme et Pasiphae (rouge).

1.9 Conclusion

La masse de Jupiter est si conséquente que la planète depuis 4.5 milliards d'années a entraîné dans son sillage une multitude de petits corps. Certains comme la comète Shoemaker-Levy 9 se sont écrasés à la surface de la planète, ou bien comme on peut le constater par la présence de cratère, à la surface des satellites galiléens. C'est pourquoi il existe autant de satellites. Ils sont au nombre de 63 à ce jour.

Nous avons vu que Jupiter est une planète très éloigné de la nôtre par bien des aspects mais il existe un point commun important, la magnétosphère. Ce bouclier magnétique qui nous protège des radiations mortelles en provenance du Soleil est beaucoup plus vaste pour Jupiter. Il s'étend jusqu'à l'orbite de Saturne qui se situe à quelque cinq fois la distance de notre Soleil. Ce champ magnétique est provoqué sur Terre comme sur Jupiter par le mouvement différentiel entre un noyau ferrique et la surface de la planète. Ainsi la planète émet un champ magnétique polarisé. Il s'y passe donc des phénomènes identiques à la Terre comme les aurores boréales. Ce champ magnétique est intéressant puisqu'il va agir dans le cas de Jupiter sur les particules chargées en rotation autour de la planète. Ces particules forment les différents anneaux et les satellites évoluent dans ces anneaux. Nous discuterons dans le chapitre consacré au modèle dynamique de l'implication sur le mouvement des satellites que peut avoir la présence de telles particules chargées noyées dans un champ magnétique.

La dernière particularité de ce système est la taille de la planète comparée à la distance des satellites proches Amalthée, Thébé, Métis et Adrastée. D'une part, cela rend ces satellites extrêmement sensibles à la forme de la planète et à la répartition des masses. D'autre part, lorsque nous devons observer ces corps, très faibles puisqu'ils sont de petite taille, nous devons nous affranchir d'une lumière intense réémise par Jupiter. Le chapitre suivant fait état des techniques utilisées et propose un bilan des observations existantes.

Sat.	Nom	Des. UAI	R_{Jup}	Groupe	Decouv.	Observateur
I	Io		5.90	Galiléens	1610	Galileo
II	Europa		9.39	Galiléens	1610	Galileo
III	Ganymede		14.97	Galiléens	1610	Galileo
IV	Callisto		26.34	Galiléens	1610	Galileo
V	Amalthea		2.53	Satellites internes	1892	E.E. Barnard
VI	Himalia		160.31	Himalia prograde	1904	C. Perrine
VII	Elara		164.23	Himalia prograde	1905	C. Perrine
VIII	Pasiphae		330.44	Pasiphae retrograde	1908	P. Melotte
IX	Sinope		334.85	Pasiphae retrograde	1914	S. Nicholson
X	Lysithea		163.89	Himalia prograde	1938	S. Nicholson
XI	Carme		327.37	Carme retrograde	1938	S. Nicholson
XII	Ananke		297.60	Ananke retrograde	1951	S. Nicholson
XIII	Leda		156.17	Himalia prograde	1974	C. Kowal
XIV	Thebe	S/1979 J2	3.10	Satellites internes	1980	S.P. Synnott/Voyager 1
XV	Adrastea	S/1979 J1	1.80	Satellites internes	1979	D.C. Jewitt, E. Danielson
XVI	Metis	S/1979 J3	1.79	Satellites internes	1980	S.P. Synnott/Voyager 2
XVII	Callirrhoe	S/1999 J1	337.14	Pasiphae retrograde	1999	J.V. Scotti, T.B. Spahr, R.S. McMillan, J.A. Larsen, J. Montani, A.E. Gleason, T. Gehrels (1999, IAUC 7460)
XVIII	Themisto	S/1975 J1	101.89	Themisto prograde	2000	S.S. Sheppard, D.C. Jewitt, Y. Fernandez, G. Magnier (2000, IAUC 7525)
XIX	Megaclite	S/2000 J8	328.61	Pasiphae retrograde	2000	S.S. Sheppard, D.C. Jewitt, Y. Fernandez, G. Magnier (2000)
XX	Taygete	S/2000 J9	325.63	Carme retrograde	2000	S.S. Sheppard, D.C. Jewitt, Y. Fernandez, G. Magnier (2000)
XXI	Chaldene	S/2000 J10	323.11	Carme retrograde	2000	S.S. Sheppard, D.C. Jewitt, Y. Fernandez, G. Magnier (2000)
XXII	Harpalyke	S/2000 J5	291.75	Ananke retrograde	2000	S.S. Sheppard, D.C. Jewitt, Y. Fernandez, G. Magnier (2000)
XXIII	Kalyke	S/2000 J2	329.63	Carme retrograde	2000	S.S. Sheppard, D.C. Jewitt, Y. Fernandez, G. Magnier (2000)
XXIV	Iocaste	S/2000 J3	294.59	Ananke retrograde	2000	S.S. Sheppard, D.C. Jewitt, Y. Fernandez, G. Magnier (2000)
XXV	Erinome	S/2000 J4	324.46	Carme retrograde	2000	S.S. Sheppard, D.C. Jewitt, Y. Fernandez, G. Magnier (2000)
XXVI	Isonoe	S/2000 J6	323.88	Carme retrograde	2000	S.S. Sheppard, D.C. Jewitt, Y. Fernandez, G. Magnier (2000)
XXVII	Praxidike	S/2000 J7	292.44	Ananke retrograde	2000	S.S. Sheppard, D.C. Jewitt, Y. Fernandez, G. Magnier (2000)
XXVIII	Autonoe	S/2001 J1	336.35	Pasiphae retrograde	2001	S.S. Sheppard, D.C. Jewitt, J. Kleyna (2001, MPEC 2002-J54)
XXIX	Thyone	S/2001 J2	292.89	Ananke retrograde	2001	S.S. Sheppard, D.C. Jewitt, J. Kleyna (2001, MPEC 2002-J54)
XXX	Hermippe	S/2001 J3	295.57	Ananke retrograde	2001	S.S. Sheppard, D.C. Jewitt, J. Kleyna (2001, MPEC 2002-J54)
XXXI	Aitne	S/2001 J11	324.92	Carme retrograde	2001	S.S. Sheppard, D.C. Jewitt, J. Kleyna (2001, MPEC 2002-J54)
XXXII	Eurydome	S/2001 J4	319.83	Pasiphae retrograde	2001	S.S. Sheppard, D.C. Jewitt, J. Kleyna (2001, MPEC 2002-J54)

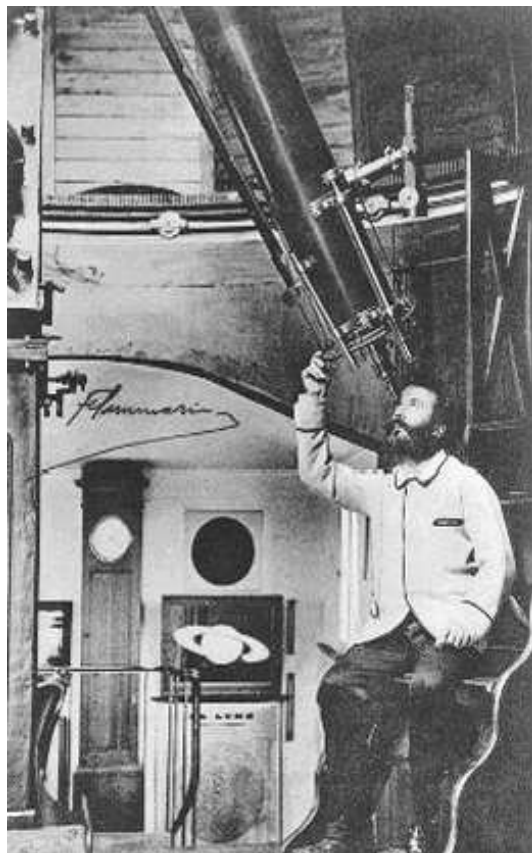
TAB. 1.3: Découverte des satellites de Jupiter.

Sat.	Nom	Des. UAI	R_{Jup}	Groupe	Decouv.	Observateur
XXXIII	Euanthe	S/2001 J7	290.90	Ananke retrograde	2001	S.S. Sheppard, D.C. Jewitt, J. Kleyna (2001, MPEC 2002-J54)
XXXIV	Euporie	S/2001 J10	270.02	Ananke retrograde	2001	S.S. Sheppard, D.C. Jewitt, J. Kleyna (2001, MPEC 2002-J54)
XXXV	Orthosie	S/2001 J9	289.82	Ananke retrograde	2001	S.S. Sheppard, D.C. Jewitt, J. Kleyna (2001, MPEC 2002-J54)
XXXVI	Sponde	S/2001 J5	328.53	Pasiphae retrograde	2001	S.S. Sheppard, D.C. Jewitt, J. Kleyna (2001, MPEC 2002-J54)
XXXVII	Kale	S/2001 J8	324.75	Carme retrograde	2001	S.S. Sheppard, D.C. Jewitt, J. Kleyna (2001, MPEC 2002-J54)
XXXVIII	Pasithee	S/2001 J6	321.77	Carme retrograde	2001	S.S. Sheppard, D.C. Jewitt, J. Kleyna (2001, MPEC 2002-J54)
		S/2000 J11	175.61	Himalia prograde	2000	S.S. Sheppard, D.C. Jewitt, Y. Fernandez, G. Magnier
		S/2002 J1	320.75	Carme retrograde	2002	S.S. Sheppard (2002, IAUC 8035)
		S/2003 J1	330.96	Pasiphae retrograde	2003	S.S. Sheppard (2003, IAUC 8087)
		S/2003 J2	413.21	Pasiphae retrograde	2003	S.S. Sheppard (2003, IAUC 8087)
		S/2003 J3	282.84	Pasiphae retrograde	2003	S.S. Sheppard (2003, IAUC 8087)
		S/2003 J4	334.72	Pasiphae retrograde	2003	S.S. Sheppard (2003, IAUC 8087)
		S/2003 J5	328.64	Pasiphae retrograde	2003	S.S. Sheppard (2003, IAUC 8087)
		S/2003 J6	297.42	Pasiphae retrograde	2003	S.S. Sheppard (2003, IAUC 8087)
		S/2003 J7	335.44	Pasiphae retrograde	2003	S.S. Sheppard (2003, IAUC 8087)
		S/2003 J8	334.96	-	2003	S.S. Sheppard (2003, IAUC 8088)
		S/2003 J9	327.09	-	2003	S.S. Sheppard (2003, IAUC 8089)
		S/2003 J10	322.29	-	2003	S.S. Sheppard (2003, IAUC 8089)
		S/2003 J11	336.30	-	2003	S.S. Sheppard (2003, IAUC 8089)
		S/2003 J12	245.93	-	2003	S.S. Sheppard (2003, IAUC 8089)
		S/2003 J13	335.02	-	2003	S.S. Sheppard (2003, IAUC 8116)
		S/2003 J14	335.86	-	2003	S.S. Sheppard (2003, IAUC 8116)
		S/2003 J15	316.50	-	2003	S.S. Sheppard (2003, IAUC 8116)
		S/2003 J16	293.14	-	2003	B. Gladman (2003, IAUC 8116)
		S/2003 J17	321.60	-	2003	B. Gladman (2003, IAUC 8116)
		S/2003 J18	286.94	-	2003	B. Gladman (2003, IAUC 8116)
		S/2003 J19	329.17	-	2003	B. Gladman (2003, IAUC 8125)
		S/2003 J20	237.63	-	2003	S.S. Sheppard (2003, IAUC 8125)
S/2003 J21	294.70	-	2003	S.S. Sheppard, B. Gladman (2003, IAUC 8138)		
S/2003 J22	296.01	-	2003	S.S. Sheppard, B. Gladman (2004, IAUC 8276)		
S/2003 J23	329.59	-	2003	S.S. Sheppard, IAUC 8281)		

TAB. 1.4: Découverte des satellites de Jupiter. (Suite)

Chapitre 2

Les Observations



2.1 Introduction

Le sujet de la thèse étant l'étude des petits satellites de Jupiter, il a fallu pour cela faire le bilan des observations existantes dans un premier temps. Ensuite, j'ai participé à un certain nombre de missions d'observations afin d'obtenir de nouvelles données. Ce sont ces nouvelles données qui augmentent l'intervalle de validité de l'éphéméride de ces satellites. Le choix de travailler sur une solution du mouvement par intégration numérique joue sur la durée de l'intervalle de validité d'une telle solution. En effet, l'intégration numérique permet d'ajuster les conditions initiales (cf chapitre 3) sur les observations existantes. Une fois ces observations bien représentées, il va de soi qu'entre les dates de ces observations les mouvements des satellites intégrés seront aussi, bien représentés. Mais au-delà de l'intervalle des observations les erreurs propagées par les calculs numériques n'ont de cesse de s'accroître. C'est pourquoi, il est important ici de faire un point sur les observations existantes pour définir un intervalle de validité de la solution numérique. Il sera cependant nécessaire de continuer les missions d'observations.

Je présente les différentes méthodes qui ont permis de réaliser une astrométrie de précision des satellites proches. Le problème majeur de telles observations est la quantité de lumière réémise par Jupiter. L'observation directe réalisée en présence d'un cache diminue le contraste de lumière entre la planète et le satellite. Mais ce sont les observations infrarouges qui sont les plus efficaces en terme de mesure astrométrique puisque la lumière dans la longueur d'onde du méthane, est fortement absorbée par l'atmosphère de la planète. Ainsi les images présentent une quantité d'étoiles non négligeable pour réaliser l'astrométrie.

2.2 Les observations anciennes

La construction des grands réfracteurs à la fin du XIX^{ème} siècle, a permis d'obtenir des observations précises des satellites planétaires. L'erreur moyenne des observations visuelles faites avec un micromètre était d'environ 0.4 seconde de degré. L'erreur systématique était due, en majeure partie, à la détermination de la forme du disque de la planète dont le centre était assimilé au centre du repère.

En 1885, H. Struve met en place une méthode d'ajustement de l'orbite des satellites par l'observation relative à un autre satellite [7]. L'usage d'une telle méthode a permis d'améliorer grandement les orbites des satellites puisque cela éliminait les erreurs systématiques dans la détermination de la position de la planète. Finalement une telle observation visuelle inter-satellite avait une erreur moyenne d'environ 0.2 seconde de degré. Malheureusement, la méthode de Struve n'était pas toujours applicable ou n'était pas forcément avantageuse. C'est pourquoi les observations relatives à la planète ont continué. Ce n'est qu'au début du XX^{ème} siècle, avec l'avènement de la photographie, que la méthode de Struve fut fortement utilisée.

2.3 Observations modernes

Nous proposons de faire un rappel des observations (photographiques ou CCD) existantes des quatre satellites de Jupiter internes à l'orbite de Io : Amalthée, Thébé, Métis et Adrastée. Leur magnitude visuelle respective est 14.1, 15.7, 17.5, 19.1 alors qu'ils se situent à quelques 50 secondes de degré de la planète, de magnitude négative à l'opposition. La diversité de ces observations montre combien il est difficile de s'affranchir de la lumière qu'émet Jupiter.

La méthode la plus courante était de s'affranchir de la lumière émise par la planète en cachant celle-ci. Mais la lumière diffusée autour du cache reste tout de même importante. Ceci limite les temps de poses à l'apparition stricte du satellite sur le fond de ciel et peu d'étoiles apparaissent pour effectuer une astrométrie correcte.

Différentes méthodes permettent de réaliser le cache. Des caches réalisés à partir de l'évaporation d'une goutte métallique furent utilisés notamment pour les observations photographiques de D. Pascu. Nous avons utilisé au Pic du Midi un simple cache circulaire que nous avons monté au foyer primaire du télescope, puis un objectif de transfert d'image permet de réimager le plan focal du télescope sur le plan du CCD¹. Dans un deuxième temps nous avons utilisé une tige cônica montée sur un support à vis millimétrique. Ce procédé a rendu l'installation du cache au foyer principal un peu plus aisée. La dernière méthode tire ses avantages de l'utilisation d'un détecteur infrarouge. L'intensité de la lumière solaire renvoyée par Jupiter décroît fortement dans certaines bandes d'absorption moléculaire, comme celles du méthane ou de l'hydrogène moléculaire. Ainsi en observant à $\lambda = 2.2\mu m$, le contraste entre la lumière émise par le satellite et celle émise par la planète est moins important. Ainsi on se permet de poser plus longtemps et on est en mesure de voir apparaître les satellites avec un rapport signal sur bruit supérieur à celui d'un détecteur CCD classique. L'autre avantage qui n'est pas le moindre, est l'apparition d'un plus grand nombre d'étoiles dans le champ. Ceci nous permettra de calculer les constantes de plaques pour l'astrométrie.

2.3.1 Observations spatiales

Aux nombre de deux, les sondes Voyager ont été développées par le Jet Propulsion Laboratory (USA). C'est Voyager 2 qui, la première, fut lancée le 20 août 1977 mais sur une trajectoire plus lente que Voyager 1. Le but de la mission était d'étudier les planètes Jupiter et Saturne. Jupiter est atteinte la première le 5 mars 1979 par Voyager 1 et le 8 juillet suivant par Voyager 2. Puis, après plusieurs révolutions et en utilisant la gravité de la planète, elles prennent la direction de Saturne comme l'avait fait Pioneer 11, cinq ans auparavant. Les sondes ont notamment permis de découvrir les anneaux de Jupiter ainsi que les trois satellites Thébé, Métis et Adrastée. Des observations astrométriques existent et sont en la possession de Jacobson [4] mais elles n'ont pas été publiées. Le Cassini ISS narrow angle camera (NAC) a pris plusieurs centaines d'images de l'anneau principal de Jupiter, entre décembre 2000 et janvier 2001. Les satellites Métis et Adrastée sont visibles sur certaines images [8].

2.3.2 Observations de I. Kulyk, K. Jockers, N. Karpov et A. Sergeev (1998-2000) [1]

Les quatre satellites Amalthée, Thébé, Métis et Adrastée ont été observés durant les périodes d'octobre-novembre 1999 et novembre 2000. Les auteurs présentent les observations sous forme de coordonnées différentielles équatoriales $\Delta\alpha$ et $\Delta\delta$ relatives aux satellites galiléens pour Amalthée et Thébé et relatives à Amalthée, Thébé et aux satellites galiléens pour Métis et Adrastée. Ils ont utilisé le télescope Zeiss RCC de 2 m de l'observatoire du Pic Terskol [UAI :B18]² situé dans le nord du Caucase. Les premiers résultats présentant les observations et les méthodes de réduction ont été publiés en 1999 [9]. Le détecteur utilisé est le Two-Channel Focal Reducer du Max-Planck Institut für Aeronomie (MPAe, Allemagne). Les rayons lumineux provenant du plan focal sont recollimatés et divisés via deux canaux.

¹Charge-coupled Devices

²<http://cfa-www.harvard.edu/iau/lists/ObsCodes.html>

Le canal rouge retransmet les grandes longueurs d'onde et le canal bleu les courtes. Un masque occulteur est mis au plan focal du télescope afin de bloquer la lumière provenant de la planète et des satellites galiléens. Le masque couvre une zone de 77 secondes de degré environ. Enfin, un diaphragme de Lyot ou "Lyot Stop"³ en anglais, diminue la diffraction de Jupiter. Sur chaque canal est positionné un CCD. Sur le canal rouge le CCD a pour taille 576x385 pixels pour une échelle d'environ 0.83 seconde de degré par pixel, le champ est donc de 7.8 par 5.2 minutes de degré. Sur le canal bleu le CCD est composé d'une matrice de 576x576 pixels pour une échelle d'environ 1.01 secondes de degré par pixel. Le champ couvre 7.8 par 7.8 minutes de degré. Les observations sont réalisées avec un filtre centré sur une bande d'absorption du méthane, soit 890 nm ($\lambda = 887$ nm, FWHM = 28.5 nm). En 1999, les images sont prises à partir du canal rouge avec une échelle de 0.83 seconde de degré par pixel. En 2000, le CCD du canal bleu est monté sur le canal rouge avec une échelle de 1.01 secondes de degré par pixel pour toute la durée des observations. Les temps de pose varient entre 180 et 300 secondes. Pour faire les plages de lumière uniforme, les observateurs utilisent la lumière crépusculaire. Pour la réduction des images, ils travaillent sur une zone de 30 pixels carrés afin de soustraire la lumière diffusée par la planète. Ils interpolent en coordonnées polaires centrées sur Jupiter la zone définie des 30 pixels carrés et la soustraient aux images. La position des corps est déterminée sur l'image en ajustant une loi gaussienne bi-dimensionnelle. Les aberrations du système optique sur l'image sont calculées puis soustraites à partir de l'observation des amas NGC 457 et NGC 581.

2.3.3 Observations de P.D. Nicholson et K. Matthews (1988) [2]

P.D. Nicholson et K. Matthews ont réalisé 119 images des anneaux de Jupiter le 3 décembre 1988 avec une caméra infrarouge montée sur le télescope Hale de l'observatoire du mont Palomar. Métis et Adrastée apparaissent sur 102 images et Amalthée sur 16 images. Le détecteur utilisé est une caméra infrarouge⁴. La taille de la matrice est de 58x62 pixels. Installée au foyer primaire, l'échelle est approximativement de 0.31 pixel par seconde de degré⁵. La portion du champ du ciel vue par la caméra est de 18 par 19.4 secondes de degré. Le filtre utilisé est le filtre K' centré à $2.2\mu\text{m}$ et de largeur $0.40\mu\text{m}$. Les conditions d'observation étaient satisfaisantes avec un seeing⁶ de l'ordre de 1 seconde de degré. Le traitement des images s'est fait par soustraction des plages de lumière uniforme et par soustraction du fond de ciel pris avant et après les séries d'images sur une région proche des anneaux et dans les conditions d'observations identiques.

2.3.4 Observations de D. Pascu, J. Rohde, F. Vachier (2000-2001)

J'ai participé à deux missions d'observations à l'observatoire de Flagstaff (USNO, USA) et collaboré avec Dan Pascu⁷, Jim Rohde⁸ et Fred Vrba⁹. Nous avons obtenu 12 images du système Jovien le 9 novembre 2001, dont 12 positions de Thébé, 11 positions d'Amalthée et 1 position de Métis, ainsi que 10 positions de Thébé entre le 3 décembre 2001 et le 5 décembre 2001. Nous avons utilisé le réflecteur astrométrique Kaj Strand de 1.55 mètres.

³Un "Lyot Stop" est un diaphragme dans le plan pupille permettant de diminuer la lumière diffractée par le bord du masque occulteur.

⁴Cassegrain infrared camera (InSb) fabriquée par Santa Barbara Research Corp.

⁵à la date de l'observation 1 seconde de degré correspond à 2941 km et 1 pixel correspond à 941 km

⁶ou FWHM calculé lors de l'ajustement d'une loi (généralement gaussienne) sur la forme des objets (étoiles ou satellites) de l'image

⁷U.S. Naval Observatory, Washington DC, USA

⁸U.S. Naval Observatory, Washington DC, USA

⁹U.S. Naval Observatory, Flagstaff, USA

Le détecteur est la caméra infrarouge ASTROCAM¹⁰ [10]. La matrice est composée de 1024 pixels carrés et représente un champ de 6.25 par 6.25 minutes de degré (0.366 seconde de degré par pixel). Les observations sont effectuées avec le filtre K' ($\lambda = 2.2\mu\text{m}$ et de largeur $\delta\lambda = 0.40\mu\text{m}$). J'ai effectué la réduction de ces images en utilisant le catalogue USNO-A2 [11]. J'ai effectué la mesure des étoiles sur les images en modélisant une gaussienne suivant deux axes. Ceci nous donne pour chaque objet présent dans le champ leurs coordonnées X,Y en pixels. La transformation des coordonnées en pixels (mesurées sur les images CCD) en coordonnées absolues équatoriales a été effectuée avec le logiciel PRIAM [12].

La bande de fréquence d'observation se situe dans l'infrarouge proche. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec le filtre K-short. A cette longueur d'onde, Jupiter rayonne beaucoup moins que dans le visible. Donc sa lumière se diffuse beaucoup moins dans l'atmosphère terrestre. Un autre avantage est le temps de lecture de la matrice. De l'ordre de quelques dizaines de microsecondes, nous effectuons des sommations de 300 images dont le temps de pose est d'une seconde. Ceci nous donne une image équivalente de 300 secondes de pose mais nous avons une lumière diffusée plus faible et de meilleurs contrastes sur les objets. Enfin la taille de la matrice et le champ du télescope nous donnent une portion du ciel satisfaisante pour effectuer une astrométrie correcte car nous avons une trentaine d'étoiles du catalogue USNO-A2 exploitables sur chaque image. Par contre ce type d'observation nécessite un temps très sec puisque l'humidité de l'air aura tendance à augmenter le niveau du fond du ciel.

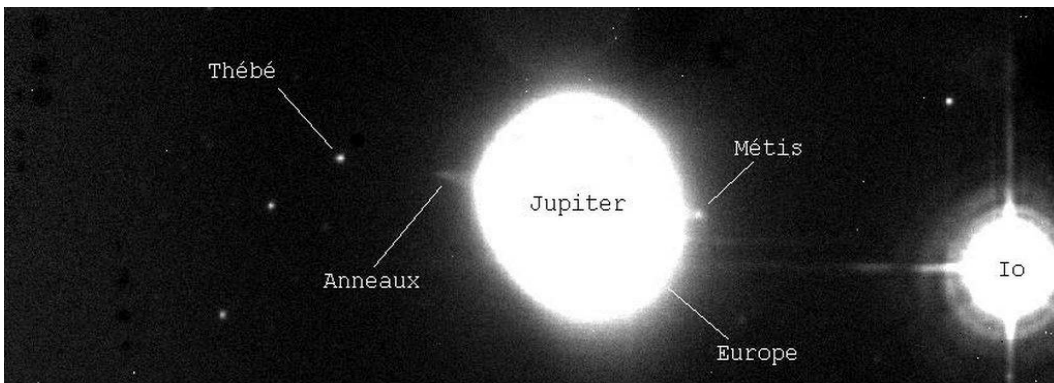


FIG. 2.1: Image réalisée à l'observatoire USNO-Flagstaff avec une caméra infrarouge. Sur l'image apparaît Thébé, Métis, Io et les anneaux de Jupiter. La croix de diffraction d'Europe qui commence à sortir de la planète.

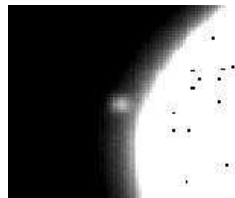


FIG. 2.2: Si on change les seuils de l'image on peut voir Amalthée qui se trouve à moins de 5" du bord de Jupiter.

¹⁰Matrix Indium Antimonide (InSb) 1024x1024 pixel. developed by Santa Barbara Research Corporation for the USNO

2.3.5 Observations de D. Pascu (1985)

Ces images ont été prises à l'observatoire USNO-Flagstaff en 1985. Lors de ma première mission aux États-Unis, Dan Pascu m'a alors prêté un jeu de bandes magnétiques sur lesquelles elles sont sauvegardées. L'obstacle principal fut de trouver une machine lisant ce genre de support. Il existe encore quelques passionnés qui gardent en état des machines déjà inscrites au musée des antiquités. Georges Debevede de l'IAP¹¹ a pu effectuer le transfert sur CDROM de l'intégralité des bandes magnétiques. Au final, sur les 54 images de Jupiter, j'ai obtenu 26 positions d'Amalthée et 10 positions de Thébé.

Je me suis aperçu que bientôt, une grande quantité d'informations sera perdue pour les générations futures. Finalement pour le stockage, les plaques photographiques peuvent être considérées comme universelles et les supports numériques éphémères.

Il y a trente ans, une grosse nuit d'observation permettait de récolter une dizaine d'images, de nos jours on peut arriver à un millier d'images. A mon sens, il faudra être vigilant à l'évolution des supports dans les années qui vont suivre, si nous ne voulons pas voir disparaître ce qui nous a permis d'élaborer de nouvelles théories.

2.3.6 Observations de R. Vieira Martins, C. Veiga et F. Vachier (1995-2001)

J'ai participé à deux missions brésiliennes en compagnie de Roberto Vieira Martins, Carlos Veiga et Pierre Bourget. Le Laboratoire national d'astrophysique se situe à Rio de Janeiro, et nous sommes allés observer à l'observatoire situé près d'Itajuba à quelques heures de route de Rio.

Lors de la première mission nous avons utilisé un coronographe à goutte de mercure fabriqué à l'observatoire de Rio par l'équipe brésilienne. Le principe est simple. Au centre des deux plaques de verre repose une goutte de mercure par cohésion moléculaire. Des vis millimétriques permettent de faire varier la distance entre ces deux plaques. En écrasant la goutte le cache s'agrandit. L'avantage est que le cache représenté sur l'image est parfaitement circulaire et que ce cache est complètement opaque. Mais la taille de la goutte est limitée par son poids qui la rend efficace pour l'observation des corps comme des étoiles doubles ou des planètes suffisamment petites comme Uranus ou Neptune. Mais pour Jupiter et Saturne le cache doit être beaucoup plus gros et la goutte de mercure a tendance à "baver" si elle est trop grosse. Très bientôt nous allons voir installer ce système sur le Cassegrain du Pic du Midi pour l'observation de satellites.

La deuxième mission d'observation, s'est tenue dans le cadre d'un accord de collaboration bilatérale CNRS/CNPQ¹² pour l'observation des satellites naturels. Lors de cette mission, en collaboration avec Roberto Vieira Martins et Marcello Assafin, nous avons utilisé un prototype de caméra infrarouge¹³ construite par le laboratoro Nacional de Astrofísico (CNPQ-Brésil) à Sao Paulo. Mais nous n'avons obtenu aucun résultat concluant.

Ces deux missions nous ont permis de travailler en collaboration avec l'équipe brésilienne. J'y ai beaucoup appris sur les méthodes d'observations, et nous avons pu comparer nos méthodes de réductions des images.

D'un point de vue thème de recherche sur les satellites de planètes et méthodes de travail, l'équipe brésilienne est très proche de la nôtre.

¹¹Institut d'Astrophysique de Paris

¹²Organisme de recherche brésilien équivalent au CNRS

¹³HAWAII Rockwell Sci. 1024x1024 pix. Sensibilité 0.8 à 2.4 μm
(<http://www.lna.br/opd/instrum/Camiv/index.html>)

2.3.7 Observations de F. Colas, J. Lecacheux, F. Vachier (2001)

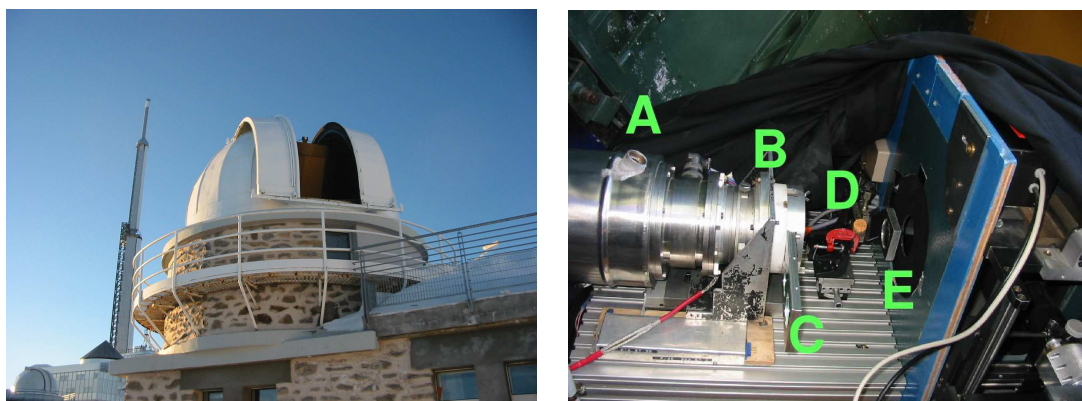


FIG. 2.3: Coupole Gentili du télescope de 1 mètre au Pic du Midi (gauche). Montage optique de l'occulteur au foyer Nasmyth-Cassegrain du télescope (droite). Sur l'image nous pouvons voir la cuve de refroidissement à l'air liquide (A), le capteur CCD et une lentille de refocalisation (B), la barrette à filtre (C), l'occulteur (D), une lentille réductrice de focale (E). La lumière arrive par la droite de l'image.

J'ai participé à plusieurs missions au Pic du Midi avec François Colas et Jean Lecacheux (décembre 2000, janvier 2001, décembre 2001, décembre 2002, janvier 2003). Nous avons utilisé une caméra CCD type THX 7863 sur le télescope de 1 mètre dans le proche infrarouge ($\lambda \equiv 800\text{nm}$, on coupe à 670nm). Le montage optique est présenté sur la figure 2.3.

Nous nous sommes affranchis de la lumière de Jupiter par un simple cache monté au foyer du cassegrain. Puis, une optique supplémentaire¹⁴ permet de refocaliser l'image sur le CCD. Ceci nous permet d'observer Thébé et Amalthée et d'avoir quelques étoiles pour l'astrométrie. Mais cela nécessite un excellent seeing (1") et une bonne transparence de l'atmosphère. Sur les 6 missions effectuées durant ma thèse seule la mission de décembre 2001 m'a apporté des résultats exploitables.

Nous avons pu, avec François Colas, utiliser le télescope Bernard Lyot de 2 mètres au Pic du Midi en décembre 2002. Le détecteur est une caméra infrarouge MOÏCAM et est composé d'un chipset de type NICMOS3 de taille 256x256 pixels. Le champ de 2 minutes donne des pixels de 0.5". Mais des ennuis techniques nous empêchaient de poser plus de 30 secondes sans que l'image soit floue. Nous étions donc dans l'impossibilité d'obtenir des résultats.

2.4 Traitement de l'image et calcul des positions

J'ai pu essayer différents logiciels de manipulation d'images pour traiter les observations des satellites de Jupiter. Ce traitement comprend principalement une phase de correction radiométrique et une phase de mesure de position. Mais devant l'aspect atypique de ces images, il était difficile de trouver un outil adapté pour réaliser une détection des objets et effectuer une astrométrie efficace.

La principale difficulté de cette étude est de pouvoir pointer les satellites alors qu'il sont noyés dans un fort gradient de lumière diffusée par Jupiter et ont un signal légèrement au-dessus du bruit. Pour ce faire, j'ai utilisé des outils qui m'ont paru peu adaptés

¹⁴un réducteur focal

pour toutes sortes de raisons, comme ASTROL¹⁵, DS9¹⁶, CCDPHOT¹⁷. J'ai essayé le programme TASPE réalisé par P. Descamps sous IDL adapté à l'astrométrie des images réalisées en optique adaptative. Les résultats sont très largement satisfaisant surtout en matière d'ajustement du profil stellaire. En attendant que ce type de programme de traitement d'images arrive à maturité, j'ai commencé par créer ma propre application en Fortran 90 et avec la bibliothèque Fortran CFITSIO [13] de traitement d'images FITS. Cet outil permet une manipulation plutôt aisée des images. En fournissant les coordonnées équatoriales des étoiles susceptibles d'être dans le champ, il est possible d'extraire rapidement les positions de tous les corps du champ.

Enfin après l'étape de pointage des objets, on extrait les informations dans un format adapté au logiciel de réduction astrométrique PRIAM¹⁸ qui transforme les coordonnées pixels en coordonnées équatoriales. Ce programme présente aussi des limites mais sa conception m'a permis de comprendre les processus d'ajustement des profils stellaires et d'en dégager des idées pour une meilleure prise en charge par l'informatique, de la chaîne de traitement astrométrique des images.

2.4.1 Calibration photométrique

Avant toute chose, il est nécessaire de corriger les images brutes des artéfacts dûs au détecteur CCD. Nous devons évaluer chaque étape du processus de transformation de la lumière en charges électriques pour procéder à des corrections radiométriques.

La première correction vient du fait qu'une acquisition de temps de pose nul donne un signal résiduel appelé offset électronique ou bruit électronique. On évalue cette correction en prenant des images de temps de pose nul I_{offset} . De manière idéale, les offset doivent être pris entre chaque image, en pratique on peut prendre plusieurs clichés à des moments réguliers de la nuit.

La deuxième correction concerne l'agitation thermique qui produit des électrons libres et fournit des valeurs non nulles lors de la lecture de la matrice. Ceci a pour conséquence la production d'un signal thermique qui s'ajoute à l'image. On réalise, dans le noir absolu, des images de temps de pose équivalent à celui des images prises sur la voûte céleste. On appelle ces images les "noirs" ou "Dark" en anglais. Les noirs des précédentes nuits d'observation peuvent être réutilisés. On sommera n noirs pour réaliser la carte de noir I_{noir} , et on notera N le rapport de l'intensité moyenne d'une de ces cartes avec celle de l'image à corriger. Ce facteur nous permettra par la suite, lors de la correction de l'image, d'obtenir une image corrigée normalisée à sa valeur de départ.

Enfin, le rendement quantique de chaque pixel varie. Pour calculer ce rendement, on expose la matrice à une lumière uniforme, la réponse de la cible étant supposée linéaire. Il suffit de réaliser une carte résultant de la moyenne d'une série de poses exposées par une source uniforme. Cette carte I_{PLU} s'appelle la Plage de lumière uniforme (PLU) ou Flat Field en anglais. Cette source de lumière est soit fournie par l'exposition du fond du ciel au crépuscule lorsqu'il n'y a pas encore d'étoiles, soit sur la coupole éclairée par une lampe. On notera K l'intensité moyenne de la PLU.

Dans le cas d'une caméra infrarouge la réponse de chaque pixel n'est pas forcément linéaire. La linéarisation de chaque pixel doit être effectuée par une routine qui transforme la valeur obtenue en une valeur linéaire. Cette transformation provient d'une étude très

¹⁵F. Colas, Imcce, Observatoire de Paris

¹⁶SAOImage DS9 : Astronomical Data Visualization Application, Smithsonian Astrophysical Observatory in Cambridge, Massachusetts

¹⁷Descamps, Imcce, Observatoire de Paris

¹⁸A. Fienga, J. Berthier, Imcce, Observatoire de Paris

poussée sur la matrice en effectuant des milliers de PLU. Ce fut le cas pour les images de Flagstaff qui ont dû être corrigées par F. Vrba avant que je puisse les utiliser.

Pour corriger une image prise par une caméra électronique, l'équation de correction devant être effectuée sur l'image CCD brute (ou une image linéarisée provenant d'une caméra infrarouge) peut s'écrire :

$$I_{corrigé}(x, y) = \frac{(I_{brute}(x, y) - I_{offset}(x, y)) - (I_{noir}(x, y) - n I_{offset}(x, y))}{I_{PLU}(x, y)} N K \quad (2.1)$$

2.4.2 Visualisation

Les images obtenues à partir des observations des satellites proches de Jupiter sont extrêmement difficiles à manipuler puisque la lumière renvoyée par la planète forme un cône saturé qui monopolise toute l'image (Fig 2.4). Les images CCD faites au Pic du Midi sont composées en plus d'une bande occultrice qui cache la planète, mais aussi d'une large zone susceptible d'avoir des étoiles de référence. Visualiser de telles images oblige en fait, à visualiser de petites zones seuillées de telle manière à voir ressortir les objets du champ.

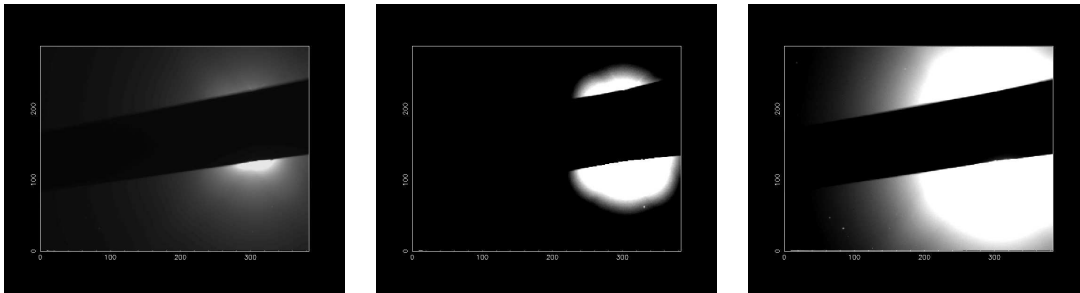


FIG. 2.4: Image de Jupiter réalisée au T1M du Pic du Midi avec un occulteur. Un seuillage différent permet de visualiser les zones composées d'étoiles ou de se rapprocher de la planète à la recherche des petits satellites.

2.4.3 Pointage

Après avoir identifié les images composées du satellite à étudier et d'un nombre suffisant d'étoiles, il est nécessaire de calculer la position sur l'image en coordonnées pixels. Pour cela il faut reconnaître les objets sur l'image. Ce qui paraît facile pour un champ d'étoiles ne l'est pas forcément pour un satellite à la limite de la détection situé à proximité d'une planète brillante. Puis, pour chaque objet nous devons ajuster un profil correspondant à la forme que fait la lumière émise par l'objet sur le détecteur.

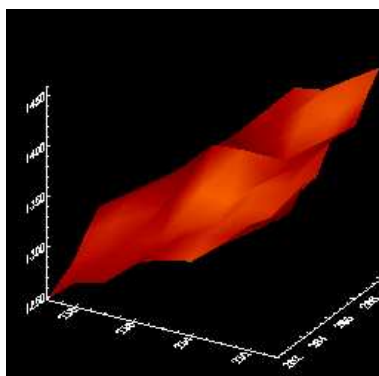


FIG. 2.5: L'image représente une zone de quelques pixels de l'image du TIM du Pic du Midi de la figure 2.4 par le logiciel TASPE. Il apparaît au centre le satellite Thébé.

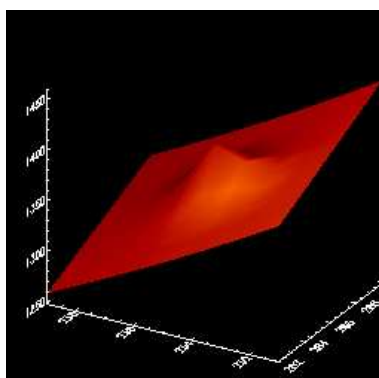


FIG. 2.6: Un fois que la zone où se situe l'objet est déterminée, le fond du ciel ainsi que le profil stellaire de l'objet sont ajustés par moindres carrés sur l'image réelle (fig 2.5). On obtient une image ajustée. Elle ne respecte pas la répartition discrète des pixels, c'est pourquoi elle a cet aspect lissé.

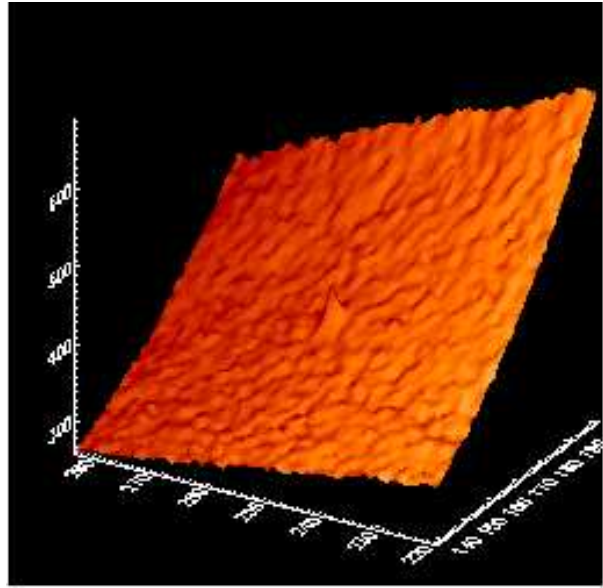


FIG. 2.7: On peut voir sur cette image le fort gradient de lumière émise par Jupiter, le bruit de mesure ainsi qu'une étoile (au centre) dont le profil se situe légèrement au dessus du bruit.

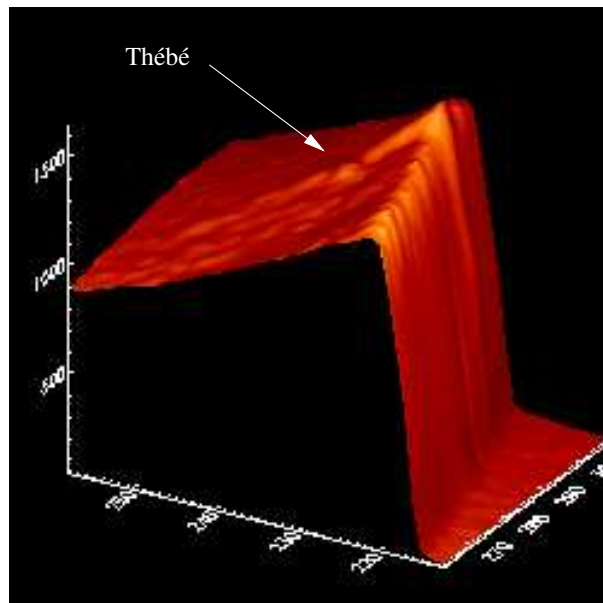


FIG. 2.8: La dernière image est intéressante puisque sur la partie de droite on voit que la valeur des pixels s'effondre à une valeur nulle. Ceci est dû à la saturation du puits de potentiel, de la matrice CCD, par la lumière incidente de Jupiter. Sur la partie de gauche, on peut voir une traînée qui correspond à la lumière, provenant de Io, diffractée par la monture du miroir secondaire du télescope. Le petit décrochement dans la rainure est dû au satellite Thébé qui apparaît.

2.5 Constitution du catalogue des observations

Je présente ici, la quasi-totalité des observations des satellites Métis, Adrastée, Amalthée et Thébé. Ces observations sont issues des publications scientifiques, de communications privées, ainsi que de mes propres missions d'observations. Je présente dans la table 2.1, le nombre total de ces observations. Ensuite je décris chaque ensemble d'observations en les regroupant par auteur (les auteurs écrits en gras sont ceux dont je possède les données). Par la suite, je considérerai seulement les observations photographiques et CCD, dont les résidus sont inférieurs à 2 secondes de degré. Dans le chapitre 3, je présenterai les résultats des ajustements effectués sur ces observations. La totalité des observations en notre possession, peut être consultée en ligne sur le serveur de l'I.M.C.C.E. à l'adresse [<http://www.imcce.fr/page.php?nav=fr/ephemerides/donnees/njo/index.php>] (voir Figure 2.10). Les graphes présentant les résidus sont fournis en Annexe.

Satellites	Metis	Adrastée	Amalthée	Thébé
Nombre	140	90	759	1346

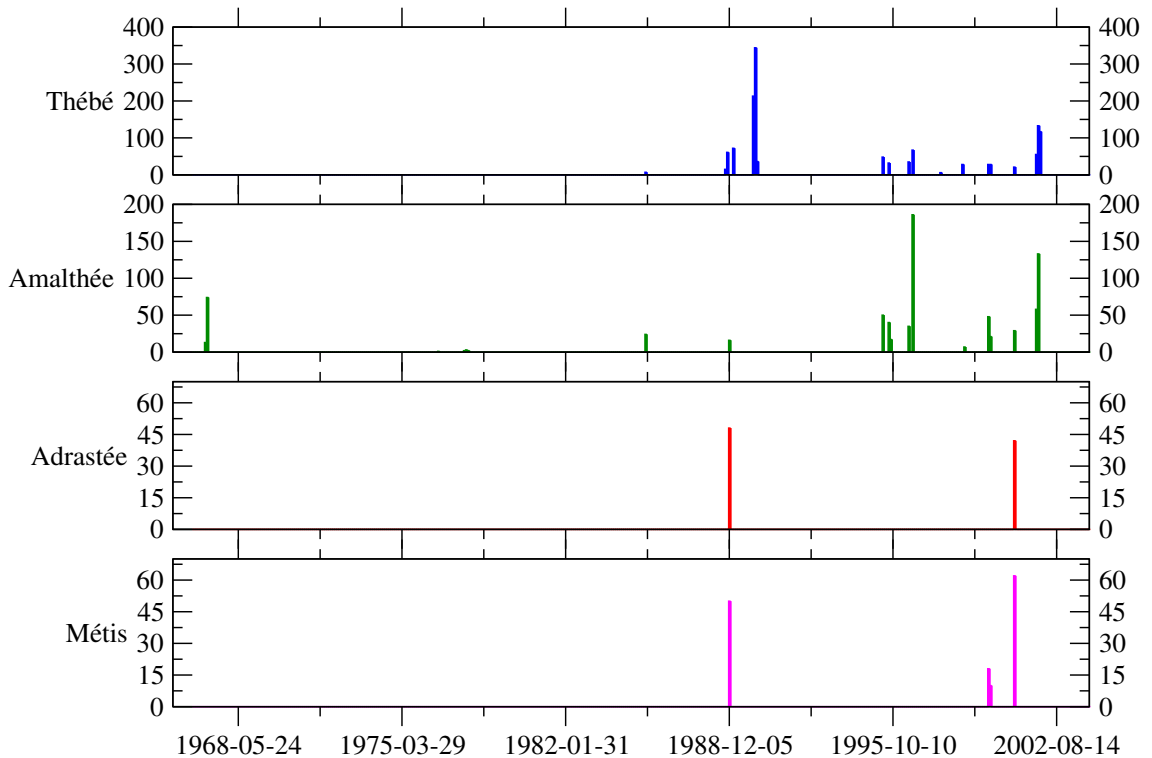


FIG. 2.9: Chronogrammes des observations disponibles, des quatre satellites internes de Jupiter. Ils caractérisent la répartition des observations, de 1968 à 2003. Les échelles en Y pour chaque satellite, sont différentes. Elles représentent le nombre d'observation faites dans le mois.

J2000
Code IAU de l'observatoire : 674
Nombre d'observations : 318

Date Julienne	Date Gregorienne	Xobs	Yobs	Xomc	Yomc	Xomj	Yomj
2449860.556129630	1995/05/23 01:20:49.600	16 41 23.3687	-21 23 1.971	-0.2530	-0.2404	-0.2696	-0.1540
2449860.559282408	1995/05/23 01:25:22.000	16 41 23.1590	-21 23 1.710	-0.3372	-0.2690	-0.3534	-0.1820
2449860.560138889	1995/05/23 01:26:36.000	16 41 23.1061	-21 23 1.580	-0.2336	-0.2165	-0.2500	-0.1290
2449860.561053241	1995/05/23 01:27:55.000	16 41 23.0372	-21 23 1.416	-0.2997	-0.1347	-0.3157	-0.0470
2449860.563460648	1995/05/23 01:31:22.999	16 41 22.8731	-21 23 1.297	-0.2471	-0.2292	-0.2626	-0.1420
2449860.567456019	1995/05/23 01:37:08.200	16 41 22.6034	-21 23 1.124	-0.1731	-0.4016	-0.1866	-0.3140
2449860.568265046	1995/05/23 01:38:18.099	16 41 22.5357	-21 23 0.748	-0.3488	-0.0941	-0.3645	-0.0060
2449860.569356482	1995/05/23 01:39:52.400	16 41 22.4664	-21 23 0.782	-0.2823	-0.2199	-0.2975	-0.1320
2449860.570266203	1995/05/23 01:41:10.999	16 41 22.4066	-21 23 0.721	-0.2591	-0.2347	-0.2738	-0.1470

E MÉCANIQUE CÉLESTE ET DE CALCUL DES ÉPHÉMÉRIDES

- Paramètres orbitaux
- paramorbitaux THEBE
- Données observationnelles

Les observations du satellite sont représentées dans la table suivante. Les observations sont groupées suivant l'observateur et l'année. Le site d'observation et donné par le code IAU de l'observatoire. Enfin, la dernière colonne présente le repère dans lequel sont représentées les observations (astrométrique J2000 ou Topocentrique apparent de la date). Les observations sont présentées sous forme de pages dynamiques écrites en PHP-MySql. Il est toutefois possible de récupérer les données : fichier texte. Les observations sont aussi présentées sous forme de graphes.

Observations	Lieu	Nombre
Carlos et al. 1996, Itabora, Brésil	874	318
Pascu et al. 2000, Flagstaff, USA.	689	10
Pascu et al. 2001, Flagstaff, USA.	689	7
Pascu et al. 1985, Flagstaff, USA.	689	7
Colas et al., 2001, Pic du Midi, France.	586	102
Colas, 1991, Pic du Midi, France.	586	221
Kulik, 1999, Pk Terskol, Ukraine.	618	28
Ledovskaya, 1998, Pk Terskol, Ukraine.	618	15
Ledovskaya, 1998, Pk Terskol, Ukraine.	618	13
Ledovskaya, 1998, Pk Terskol, Ukraine.	618	14

LES SATELLITES INTERNES DE JUPITER

Les satellites de Jupiter considérés ici, ont la particularité de se mouvoir à l'intérieur de l'orbite de Io. Nous nommerons cette famille de satellites la "famille des satellites internes de Jupiter". Trois des quatre satellites qui la composent, Métis, Adrastea et Thébé, ont été découverts en 1979 par les sondes Voyager. Amalthea est le plus ancien découvert en 1892 par Edward Emerson Barnard.

Pour observer les satellites de planètes depuis la Terre, puis pour les identifier sur les images, nous devons connaître leur position relative à la planète. Le fait de connaître leur position nécessite de construire un modèle théorique. Ce modèle est basé sur l'environnement du système gravitationnel de la planète. Mathématiquement, il s'écrit par les équations de la dynamique et se résout numériquement, grâce à l'informatique, par intégration numérique. Il est donc possible d'aider ce modèle sur les observations pour obtenir une nouvelle solution du mouvement de ces corps. De cette manière itérative, nous obtenons une éphéméride de plus en plus précise.

Nous allons recenser les observations photographiques et CCD de ces satellites, faites à travers le monde. Chaque date d'observation est associé le résultat de la théorie planétaire IAU (Near Jupiter Objects) issue de l'intégration numérique. En comparaison nous présentons les résidus issus de la solution proposée par le Jet propulsion Laboratory.

- [THEBE](#)
- [AMALTHEE](#)
- [ADRASTEIE](#)
- [METIS](#)

E MÉCANIQUE CÉLESTE ET DE CALCUL DES ÉPHÉMÉRIDES

Les observations du satellite sont représentées dans la table suivante. Les observations sont groupées suivant l'observateur et l'année. Le site d'observation et donné par le code IAU de l'observatoire. Enfin, la dernière colonne présente le repère dans lequel sont représentées les observations (astrométrique J2000 ou Topocentrique apparent de la date). Les observations sont présentées sous forme de pages dynamiques écrites en PHP-MySql. Il est toutefois possible de récupérer les données : fichier texte. Les observations sont aussi présentées sous forme de graphes.

FIG. 2.10: Démonstration des pages concernant les satellites internes de Jupiter sur le nouveau serveur Web de l'IMCCE.

VOYAGER 1/2

- ▶ Date : 23 Février 1979
- ▶ Source : Synott, 1980
- ▶ Remarques : Découverte de Thébé, Métis et Adrastée
- ▶ Date : 6 Juillet 1979
- ▶ Remarques : Position de Thébé par rapport à Amalthée (précision estimée a 0.8")

JEWITT

- ▶ Date : Mars 1981
- ▶ Source : Jewitt et al, 1981 [14]
- ▶ Observatoire : Mt Palomar (USA) [code UAI :675]
- ▶ Remarques : Première observation de Thébé à partir d'un observatoire terrestre

VAN BIESBROECK

- ▶ Date : 1954
- ▶ Source : Van Biesbroeck G.[15]
- ▶ Observatoire : McDonald Observatory, Fort Davis - reflector, D = 82 inch [code UAI :711]
- ▶ Remarques : Observations photographiques
- ▶ Réduction : Astrographic stars of Paris zone
- ▶ Centre du repère : Topocentrique
- ▶ Epoque de l'équinoxe : De la date
- ▶ Echelle de temps : UTC
- ▶ Type de coordonnées : Absolue
- ▶ Satellite : Amalthée
 - ▷ Observations disponibles : 41

SUDBURY

- ▶ Date : 1969
- ▶ Source : Sudbury P. V. [16]
- ▶ Observatoire : Kottomia Grubb Parsons reflector, D = 74 inch, f/18 [code UAI :88]
- ▶ Remarques : Observations photographiques
- ▶ Réduction : Utilisation du catalogue FK4
- ▶ Centre du repère : Topocentrique
- ▶ Epoque de l'équinoxe : de la date
- ▶ Echelle de temps : UTC
- ▶ Type de coordonnées : Absolue
- ▶ Satellite : Amalthée
 - ▷ Observations disponibles : 90

IANNA

- ▶ Date : 1977
- ▶ Source : Ianna P. A., Seitzer P., Levinson F. (1979) [17]
- ▶ Observatoire : Leander McCormick Observatory, Charlottesville [code UAI :780]
- ▶ Remarques : Observations photographiques avec le Clark photovisual refractor, D = 67 cm.
- ▶ Réduction : Utilisation du catalogue AGK3
- ▶ Centre du repère : Topocentrique
- ▶ Epoque de l'équinoxe : B1950
- ▶ Echelle de temps : UTC

- ▶ Type de coordonnées : Absolue
- ▶ Satellite : Amalthée
 - ▷ Observations disponibles : 2

MULHOLLAND

- ▶ Date : 29 Septembre 1976 au 9 Janvier 1978.
- ▶ Source : Mulholland J. D., Benedict G. F., Shelus P. J.[18]
- ▶ Observatoire : McDonald Observatory, Fort Davis - Otto Struve reflector, D = 2.2 m [code UAI :711]
- ▶ Remarques : Observations photographiques
- ▶ Réduction : Utilisation du catalogue SAO
- ▶ Centre du repère : Topocentrique
- ▶ Epoque de l'équinoxe : B1950
- ▶ Echelle de temps : UTC
- ▶ Type de coordonnées : Absolue
- ▶ Satellite : Amalthée
 - ▷ Observations disponibles : 6

NICHOLSON

- ▶ Date : 3 Décembre 1988
- ▶ Source : Nicholson 1988, [2]
- ▶ Observatoire : Mt Palomar (USA) [code UAI :675]
- ▶ Remarques :
- ▶ Réduction :
- ▶ Centre du repère : Topocentrique
- ▶ Epoque de l'équinoxe : B1950
- ▶ Echelle de temps : UTC
- ▶ Type de coordonnées : Jupiter, coordonnées équatoriales différentielles
- ▶ Satellite : Amalthée
 - ▷ Observations disponibles : 16
- ▶ Satellite : Métis
 - ▷ Observations disponibles : 50
- ▶ Satellite : Adrastée
 - ▷ Observations disponibles : 48

D. PASCU

- ▶ Date : 1985
- ▶ Source : D. Pascu, Bandes Magnétiques
- ▶ Observatoire : Flagstaff (USA) (D. Pascu) [code UAI :689]
- ▶ Centre du repère : Topocentrique
- ▶ Epoque de l'équinoxe : de la date
- ▶ Echelle de temps : UTC
- ▶ Type de coordonnées : Absolue
- ▶ Réduction : IMCCE, F.Vachier
- ▶ Satellite : Amalthée
 - ▷ Observations disponibles : 26
- ▶ Satellite : Thébé
 - ▷ Observations disponibles : 10
- ▶ Date : 1996 - 1997
- ▶ Source : D. Pascu

- ▶ Observatoire : Flagstaff (USA) [code UAI :689]
- ▶ Réduction : D. Pascu
- ▶ Centre du repère : Topocentrique
- ▶ Epoque de l'équinoxe : de la date
- ▶ Echelle de temps : UTC
- ▶ Type de coordonnées : Amalthée, coordonnées équatoriales différentielles
- ▶ Satellite : Thébé
 - ▷ Observations disponibles : 48

F. COLAS

- ▶ Date : 1988 à 1991
- ▶ Source : These F. Colas
- ▶ Observatoire : Pic du Midi (France) [code UAI :586]
- ▶ Réduction : IMCCE, F. Colas
- ▶ Centre du repère : Topocentrique
- ▶ Epoque de l'équinoxe : de la date
- ▶ Echelle de temps : UTC
- ▶ Type de coordonnées : Jupiter, coordonnées équatoriales différentielles
- ▶ Satellite : Thébé
 - ▷ Observations disponibles : 899

C. VEIGA ET R.V. MARTIN

- ▶ Date : 1995 à 2001
- ▶ Source : C. Veiga et R.V. Martins
- ▶ Observatoire : Itajuba (Brésil) Réflecteur 1.6m + Coronographe [code UAI :874]
- ▶ Réduction : C. Veiga
- ▶ Centre du repère : Topocentrique
- ▶ Epoque de l'équinoxe : J2000
- ▶ Echelle de temps : UTC
- ▶ Type de coordonnées : Absolue
- ▶ Satellite : Amalthée
 - ▷ Observations disponibles : 537
- ▶ Satellite : Thébé
 - ▷ Observations disponibles : 374

KULYK ET AL.

- ▶ Date : 1999 / 2000
- ▶ Source :
- ▶ Observatoire : Observatoire de Pic Terskol [code UAI :B18]
- ▶ Téléscope : 2-m Zeiss RCC telescope
- ▶ Remarques : Le réducteur focal à 2 voix du Max Planck Institute a été utilisé
- ▶ Réduction : Positions d'Amalthée et Thébé par rapport aux Galiléens. Les coordonnées astrométriques topocentriques J2000 des Galiléens ont servi à réduire le facteur d'échelle et l'orientation. Correction de la réfraction différentielle et aberration différentielle au premier ordre.
- ▶ Centre du repère : Topocentrique
- ▶ Epoque de l'équinoxe : J2000/date
- ▶ Echelle de temps : UTC
- ▶ Type de coordonnées : Galiléens, coordonnées équatoriales différentielles
- ▶ Satellite : Amalthée

- ▷ Observations disponibles :
- ▶ Satellite : Thébé
 - ▷ Observations disponibles :
- ▶ Satellite : Métis
 - ▷ Observations disponibles :
- ▶ Satellite : Adrastée
 - ▷ Observations disponibles : 42

MISSION FLAGSTAFF 2000 ET 2001

- ▶ Date : 9 Novembre 2000, 3 et 5 Décembre 2001.
- ▶ Source : D. Pascu, J. Rhode, F. Vachier
- ▶ Nombre d'Obs. : 24
- ▶ Observatoire : USNO-Flagstaff (USA) Réfracteur 61 inch [code UAI :689]
- ▶ Réduction : F. Vachier
- ▶ Centre du repère : Topocentrique
- ▶ Epoque de l'équinoxe : J2000
- ▶ Echelle de temps : UTC
- ▶ Type de coordonnées : Absolue
- ▶ Satellite : Amalthée
 - ▷ Observations disponibles : 11
- ▶ Satellite : Thébé
 - ▷ Observations disponibles : 22
- ▶ Satellite : Métis
 - ▷ Observations disponibles : 1

MISSION PIC DU MIDI DÉCEMBRE 2001

- ▶ Date : 21 Décembre 2001
- ▶ Source : F. Colas, F. Vachier
- ▶ Nombre d'Obs. : 107
- ▶ Observatoire : Pic du Midi (France) [code UAI :586]
- ▶ Réduction : IMCCE, F. Vachier
- ▶ Observations utilisées :
- ▶ Centre du repère : Topocentrique
- ▶ Epoque de l'équinoxe : de la date
- ▶ Echelle de temps : UTC
- ▶ Type de coordonnées : Absolue
- ▶ Satellite : Thébé
 - ▷ Observations disponibles : 107

2.6 Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre les observations existantes des satellites Amalthée, Thébé, Métis et Adrastée, les méthodes observationnelles et de réduction des images. Il en ressort trois choses importantes :

Principalement, il faut noter la difficulté d'observation d'un corps aussi faible de quelques kilomètres de diamètre, si proche d'une planète géante comme Jupiter. Cela peut empêcher la détection mais si détection il y a, cela peut induire des erreurs sur les mesures astrométriques si le rapport signal sur bruit des satellites sur le fond du ciel n'est pas satisfaisant.

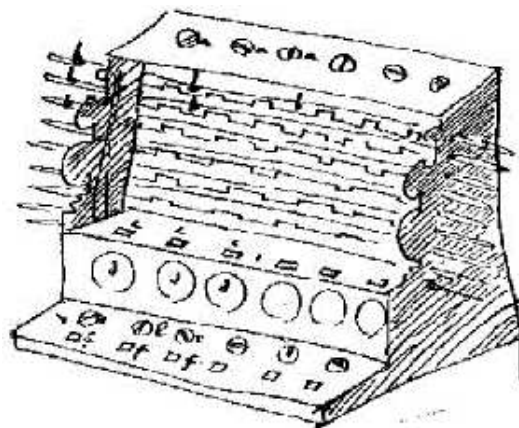
Deuxièmement, il en découle obligatoirement une carence observationnelle des satellites Adrastée et Métis. Ils se situent dans les anneaux de Jupiter, il sont donc les plus proches satellites connus de la planète. Mais ils sont aussi les plus petits en taille et très faibles en luminosité (magnitude de 18.9 pour Adrastée). Cette carence va se faire immédiatement ressentir sur la méthode numérique employée dans les prochains chapitres pour construire l'éphéméride de ces corps.

Finalement, l'observation nécessite d'avoir des points de référence. Si ce n'est des étoiles de référence il est souvent possible d'avoir d'autres satellites internes dans le champ. Il faut donc suffisamment de champ pour déterminer les constantes de plaques nécessaires à la transformation des coordonnées en pixels sur l'image en coordonnées équatoriales.

Pour conclure, il est absolument nécessaire d'effectuer des campagnes observationnelles de ces satellites, tous les ans, à chaque opposition de la planète. La caméra infrarouge est pour moi le meilleur moyen d'atteindre Adrastée puisqu'elle réduit le contraste entre le satellite et la planète tout en conservant un champ suffisamment grand pour l'astrométrie. Si la méthode d'observation oblige à mesurer la position relative d'un satellite par rapport à un autre, il sera extrêmement précieux de continuer l'observation d'Amalthée et de Thébé pour rendre leur éphéméride la plus précise possible. Ces buts peuvent être atteints en deux parties. Continuer à utiliser le 1 mètre du Pic du Midi pour atteindre Thébé et Amalthée d'une part. Il pourrait être nécessaire pour cela d'acquérir un détecteur adapté. Dans un deuxième temps il faut organiser des campagnes observationnelles pour Métis et Adrastée. L'instrument typique serait un télescope de 3 mètres doté d'une caméra infrarouge et d'un champ suffisamment large. Nous avons fait des demandes de temps de télescope pour la prochaine opposition de 2005, avec Mirel Birlan sur l'instrument IRTF à Hawaï qui se rapproche de l'instrument idéal pour ce genre d'observation.

Chapitre 3

Approche numérique du mouvement des satellites



3.1 Introduction

Le premier modèle théorique a été donné par Tisserand en 1893 pour le mouvement d'Amalthée, un an après sa découverte. Le modèle prenait en compte les perturbations séculaires au premier ordre dues à l'aplatissement de la planète. L'orbite proposée était équatoriale et elliptique. L'inclinaison sur l'orbite fut découverte par Cohn en 1896. Depuis, la méthode incluant un modèle d'ellipse précessante était plus communément usitée. Les constantes principales d'un tel modèle furent déterminées par Struve en 1906.

Depuis, les contributions les plus significatives de Woerkom (1950) et Sudbury (1969) n'étaient qu'en majeure partie des corrections sur ces constantes. Néanmoins, Van Woerkom suggéra une accélération séculaire d'Amalthée et revint à un modèle d'orbite circulaire. Mais le modèle de Van Woerkom dépend fortement des observations de 1949 s'étalant sur une période d'un mois. Sudbury a ajusté son modèle sur deux groupes d'observations. Une première période allant de 1892 à 1921, et la seconde concernant l'année 1954 et l'année 1967¹. Mais le raccordement des deux périodes ne fut pas clair. Il sépara donc les deux groupes par deux formules différentes du mouvement du noeud ascendant. Malheureusement, Sudbury fit une erreur de signe dans ces deux formules, soulevée par Greenberg en 1976, mais le problème n'était toujours pas résolu.

Sudbury proposa deux hypothèses à ce changement d'orbite entre les deux groupes d'observations. La première était le changement par saut dû au passage d'un objet dans l'environnement d'Amalthée. L'autre plus graduel serait dû à la physique intérieure de la planète. Une autre hypothèse fut donnée en 1977 par Pascu qui nota l'absence des perturbations dues aux satellites galiléens dans les modèles. Kerr et Whipple (1954) exclurent la possibilité d'une accélération séculaire due aux effets de marée ou à un ralentissement par des poussières qui seraient dans l'environnement du satellite.

L'équipe du Jet Propulsion Laboratory a basé son modèle sur une ellipse précessante (Peters 1974, Taraji et al. 1979, Synott et al. 1979) et Jacobson a déterminé les constantes orbitales en 1994. Ce modèle couvre une période entre 1900 et 1993 avec une précision de 0.4 seconde de degré. Dans le modèle de Jacobson il n'y a pas de termes quadratiques dans la longitude moyenne et il utilise une excentricité de 0.0033 ce qui confirme l'idée de Struve d'une orbite elliptique. (Struve utilisait une valeur de 0.00285 pour l'excentricité.) La première solution analytique du mouvement d'Amalthée fut proposée par Breiter en 1996 [19]. Il inclut dans son modèle les effets du potentiel Jovien, les perturbations des satellites galiléens et du Soleil et le mouvement du plan de référence. La comparaison avec une intégration numérique montre que sa solution analytique est précise à 100 mètres pendant 50 ans. Mais cette solution analytique n'a jamais été comparée aux observations du satellite.

3.2 Références et Conventions

3.2.1 Plan de référence

Le repère de référence choisi pour le calcul du mouvement des satellites de Jupiter est le plan de l'équateur moyen de la Terre et équinoxe à J2000. Ainsi nous nous affranchissons de tout mouvement du plan de référence, ce qui évite l'introduction d'un terme d'accélération de Coriolis. J'ai choisi de travailler sur des coordonnées rectangulaires dans le calcul des positions et vitesses des satellites. Dans les sections suivantes, je détaillerai les transformations liées aux changements de coordonnées pour les diverses représentations des positions

¹observations de Sudbury

des satellites.

3.2.2 Changement de repères

Pour estimer les perturbations dues à l'aplatissement de Jupiter, nous avons besoin d'exprimer la latitude du satellite θ_s par rapport à l'équateur de Jupiter dans le repère de référence. Pour cela, on note α_n, δ_n l'ascension droite et la déclinaison du pôle nord de Jupiter. On note (x, y, z) le système de coordonnées dans le repère de référence et (x', y', z') le système de coordonnées dans le plan équatorial Jovien. Le changement de coordonnées s'effectue par la double rotation par rapport à l'axe des z puis celui des x et on note :

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = R_1(90 - \delta_n).R_3(90 + \alpha_n) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

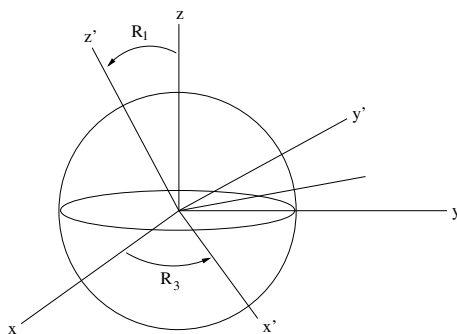


FIG. 3.1: La première rotation R_3 se fait autour de l'axe des z , la deuxième R_1 autour de l'axe x' .

d'où

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \alpha_n & \cos \alpha_n & 0 \\ -\cos \alpha_n \sin \delta_n & -\sin \alpha_n \sin \delta_n & \cos \delta_n \\ \cos \alpha_n \cos \delta_n & \sin \alpha_n \cos \delta_n & \sin \delta_n \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

ainsi

$$\sin \theta_s = \frac{z'_i}{r_i} = \frac{1}{r_i} (\cos \alpha_n \cos \delta_n x_i + \sin \alpha_n \cos \delta_n y_i + \sin \delta_n z_i) \quad (3.3)$$

Par la suite nous considérons qu'un mouvement de précession du plan équatorial Jovien est négligeable. Nous supposons donc, (α_n, δ_n) constantes durant le temps d'intégration.

3.2.3 Les changements de repères pour les données observationnelles

Dans cette section nous allons décrire les processus qui vont nous permettre de comparer les valeurs calculées aux valeurs obtenues par l'observation. Pour une date donnée TT , nous avons la possibilité soit de comparer le calcul à une position observée (dans ce cas on est en mesure de calculer un résidu en vue d'un éventuel ajustement), soit de fournir une éphéméride en vue d'une prochaine observation.

J'ai utilisé les routines du JPL DE405 pour avoir la position de la Terre et de Jupiter. Pour les satellites galiléens j'utilise une routine dérivée de "Ephem_Sat_Jupi" issue d'Eproc [20]. Cette routine fournit des positions planétocentriques des satellites suivant

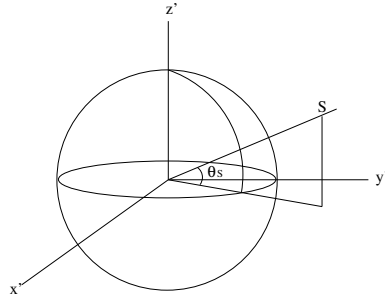


FIG. 3.2: Représentation de la latitude θ_s du satellite S dans le repère lié à l'équateur de la planète.

l'algorithme THEOG5 (Sampson-Lieske, Arlot [21]). La première étape est la transformation des dates exprimées en Temps universel en Temps Terrestre qui va être notre base de temps pour les calculs des mouvements. Ensuite nous devons connaître dans le système de coordonnées rectangulaires les vecteurs position-vitesse que l'on détaille dans la table 3.1.

A ce stade, nous avons l'expression des vecteurs dans le repère moyen² J2000. Ici le plan de référence est défini par l'équateur moyen de la Terre à J2000 et l'équinoxe à J2000. La correction du temps de lumière³ va nous permettre d'exprimer les vecteurs en coordonnées astrométrique J2000. Si on définit ce temps de lumière par τ , on procède par itération pour obtenir le vecteur astrométrique J2000 en retranchant les coordonnées barycentriques de l'observateur à la date t aux coordonnées géométriques barycentriques de l'astre à la date $t - \tau$. Le calcul s'arrête lorsque la variation de la distance Terre-satellite n'excède pas 1 km. A chaque itération on recalcule la valeur de τ par la formule suivante : en notant c la vitesse de la lumière,

$$\tau = \frac{\|\mathbf{V}_{OS}\|}{c} \quad (3.4)$$

L'expression du vecteur astrométrique J2000 pour chaque itération est de la forme :

$$\mathbf{V}_{OS}^{ast} = \mathbf{V}_{BS}(t - \tau) - \mathbf{V}_{BT}(t) - \mathbf{V}_{GO}(t) \quad (3.5)$$

On obtient ainsi les vecteurs position/vitesse en coordonnées astrométriques J2000 de Jupiter et de ces satellites liés à l'observateur. Successivement et dans l'ordre, nous devons maintenant corriger ces vecteurs par :

Transformation d'un vecteur exprimé en coordonnées astrométriques J2000 en coordonnées apparentes de la date

- ▶ Déflexion des rayons lumineux
- ▶ L'aberration annuelle
- ▶ L'aberration diurne (nulle si on considère des observations géocentriques)
- ▶ Précession
- ▶ Nutation

On obtient ainsi, les vecteurs observateur-Jupiter en coordonnées apparentes de la date \mathbf{V}_{OJ}^{app} et observateur-Satellite \mathbf{V}_{OS}^{app} . Et on effectue la projection des vecteurs apparents \mathbf{V}_{OJ}^{app} et \mathbf{V}_{OS}^{app} sur la sphère céleste pour avoir les coordonnées équatoriales apparentes

²rapporté à un équateur et un équinoxe fixes dont on précise l'époque

³Temps que va mettre la lumière pour parvenir jusqu'à la Terre

TAB. 3.1: Vecteur dans le repère moyen J2000.

Vecteur dans le repère moyen J2000

\mathbf{V}_{HT}	vecteur héliocentrique de la Terre à la date TT.
\mathbf{V}_{GO}	vecteur géocentrique de l'observateur à la date TT.
\mathbf{V}_{HO}	vecteur héliocentrique de l'observateur à la date TT.
\mathbf{V}_{JbJ}	vecteur barycentre système jovien-Jupiter à la date TT.
\mathbf{V}_{OJ}	vecteur Observateur - Jupiter à la date TT.
\mathbf{V}_{JS}	vecteur Jupiter - Satellite à la date TT. (Par intégration numérique pour Adrastée, Métis, Thébé, Amalthée et par la théorie pour les satellites galiléens.
\mathbf{V}_{OS}	vecteur Observateur - Satellite à la date TT.

Vecteur dans le repère moyen J2000 relatif au barycentre du système solaire

\mathbf{V}_{BT}	vecteur barycentre système solaire de la Terre à la date TDB.
\mathbf{V}_{BO}	vecteur barycentre système solaire de l'observateur à la date TDB.
\mathbf{V}_{Bjb}	vecteur barycentre système solaire du Barycentre de Jupiter à la date TDB.
\mathbf{V}_{BJ}	vecteur barycentre système solaire de Jupiter à la date TDB.
\mathbf{V}_{BS}	vecteur barycentre système solaire du satellite à la date TDB.

Vecteur topocentrique dans le repère moyen J2000 corrigé du temps de lumière

\mathbf{V}_{OJ}^{ast}	vecteur Observateur - Jupiter à la date TT.
\mathbf{V}_{OS}^{ast}	vecteur Observateur - Satellite à la date TT.

Vecteur dans le repère moyen de la date

\mathbf{V}_{OS}^{app}	vecteur Observateur - Satellite à la date TT.
\mathbf{V}_{OJ}^{app}	vecteur Observateur - Jupiter
\mathbf{V}_{JS}^{app}	vecteur Jupiter - Satellite à la date TT.

respectivement $\alpha^{Jup}, \delta^{Jup}$ et $\alpha^{Sat}, \delta^{Sat}$. On obtient les coordonnées apparentes équatoriales différentielles par la formule 3.6.

$$\begin{aligned} X_{Sat} &= (\alpha_{Jup} - \alpha_{Sat}) \cdot \cos(\delta_{Jup}) \\ Y_{Sat} &= \delta_{Jup} - \delta_{Sat} \end{aligned} \quad (3.6)$$

A partir de ces coordonnées, on peut faire des comparaisons à l'observation ou bien fournir une éphéméride. Certaines observations sont fournies sous forme de coordonnées équatoriales différentielles astrométriques J2000. Dans ce cas il suffit de supprimer l'étape des corrections en Précession, Nutation, etc...

3.3 Modèle dynamique

Le modèle dynamique est un modèle basé sur un problème de 9 corps perturbés par la forme de Jupiter, le corps central. L'expression des forces appliquées sur chaque satellite s'écrit :

$$\frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = -(\mu_0 + \mu_i) \frac{\mathbf{r}_i}{r_i^3} + \sum_{j=1, j \neq i}^8 \mu_j \left(\frac{\mathbf{r}_{ji}}{r_{ji}^3} - \frac{\mathbf{r}_j}{r_j^3} \right) + \nabla \mathbf{R}_i \quad (3.7)$$

En prenant comme notation : \mathbf{r}_i le vecteur planétocentrique du corps i , $\mu_i = k^2 m_i$ la masse réduite avec k la constante de Gauss et m_i la masse du corps i , $\mathbf{r}_{ji} = \mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i$ le vecteur position du corps j relatif au corps i , r_{ji} sa norme, et enfin $\nabla \mathbf{R}_i$ le gradient de la force de perturbation liée à l'aplatissement de Jupiter appliquée au corps i .

3.3.1 Conventions du programme

Nous énumérons chaque corps de la façon suivante :

Corps	masse	masse réduite	vecteur planétocentrique
Jupiter	m_0	μ_0	-
Thébé	m_1	μ_1	\mathbf{r}_1
Amalthée	m_2	μ_2	\mathbf{r}_2
Io	m_3	μ_3	\mathbf{r}_3
Europe	m_4	μ_4	\mathbf{r}_4
Ganymède	m_5	μ_5	\mathbf{r}_5
Callisto	m_6	μ_6	\mathbf{r}_6
Saturne	m_7	μ_7	\mathbf{r}_7
Soleil	m_8	μ_8	\mathbf{r}_8

Les positions du Soleil, Saturne et Jupiter sont calculées à partir de la théorie DE405. Les positions de chaque satellite sont recalculées à chaque instant à partir du modèle dynamique. Nous prendrons différentes conditions initiales pour les satellites et les planètes, à partir des théories numériques du JPL (Jacobson) ainsi que THEOG5 (IMCCE).

3.3.2 La force de perturbation liée à l'aplatissement

Les perturbations liées à la géométrie de la planète, ont pour expression :

$$R_i = -\mu_0 \sum_{k=2}^{\infty} J_k \frac{a_e^k}{r_i^{k+1}} P_k(\sin \theta_i) \quad (3.8)$$

a_e étant le rayon équatorial moyen de Jupiter, θ_i la latitude du satellite i au-dessus du plan équatorial de la planète, les J_k sont les coefficients du développement en harmoniques sphériques du potentiel de Jupiter, et les P_k sont les polynômes de Legendre calculés par la relation :

$$P_k(x) = \frac{1}{2^k k!} \frac{d^k (x^2 - 1)^k}{dx^k} \quad (3.9)$$

R_i étant fonction de r_i et de $\sin \theta_i$, le gradient ∇R_i s'exprime en calculant les dérivées partielles et nous écrivons :

$$\nabla R_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial R_i}{\partial x_i} \\ \frac{\partial R_i}{\partial y_i} \\ \frac{\partial R_i}{\partial z_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_i}{\partial x_i} & \frac{\partial \sin \theta_i}{\partial x_i} \\ \frac{\partial r_i}{\partial y_i} & \frac{\partial \sin \theta_i}{\partial y_i} \\ \frac{\partial r_i}{\partial z_i} & \frac{\partial \sin \theta_i}{\partial z_i} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial R_i}{\partial r_i} \\ \frac{\partial R_i}{\partial \sin \theta_i} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

L'expression analytique finale a été déterminée avec le logiciel Mapple jusqu'à l'ordre 4.

3.3.3 Expression des équations de la dynamique pour les forces liées au champ de gravitation de la planète

Dans l'équation (3.7) nous allons développer l'expression du dernier terme qui se résume par le $\nabla \mathbf{R}_i$. le Nabla est un gradient de force, il exprime la notion de vecteur et de dérivée en même temps. Il s'écrit et se développe par l'équation (3.10). Nous connaissons l'expression de la latitude du satellite par l'intermédiaire de l'équation (3.3). Les termes du gradient $\nabla \mathbf{R}_i$ sont explicités par les équations 3.11. Les équations suivantes, de 3.12 à 3.17, expriment les dérivées secondes nécessaires au calcul de l'ajustement de l'orbite.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial R_i}{\partial x_i} = & -\frac{\mu_0 a_e^2}{16 r_i^9} \left(\begin{array}{ll} -120 J_2 x_i r_i^4 \sin^2 \theta_s & + 48 J_2 r_i^5 \cos \delta_n \cos \alpha_n \sin \theta_s \\ + 24 J_2 x_i r_i^4 & - 630 J_4 a_e^2 x_i r_i^2 \sin^4 \theta_s \\ + 420 J_4 a_e^2 x_i r_i^2 \sin^2 \theta_s & - 120 J_4 a_e^2 r_i^3 \cos \delta_n \cos \alpha_n \sin \theta_s \\ - 30 J_4 a_e^2 x_i r_i^2 & + 280 J_4 a_e^2 r_i^3 \cos \delta_n \cos \alpha_n \sin^3 \theta_s \\ - 3003 J_6 a_e^4 x_i \sin^6 \theta_s & + 1386 J_6 a_e^4 r_i \cos \delta_n \cos \alpha_n \sin^5 \theta_s \\ + 3465 J_6 a_e^4 x_i \sin^4 \theta_s & - 1260 J_6 a_e^4 r_i \cos \delta_n \cos \alpha_n \sin^3 \theta_s \\ - 945 J_6 a_e^4 x_i \sin^2 \theta_s & + 35 J_6 a_e^4 x_i \\ + 210 J_6 a_e^4 r_i \cos \delta_n \cos \alpha_n \sin \theta_s \end{array} \right) \\
\frac{\partial R_i}{\partial y_i} = & -\frac{\mu_0 a_e^2}{16 r_i^9} \left(\begin{array}{ll} -120 J_2 y_i r_i^4 \sin^2 \theta_s & + 48 J_2 r_i^5 \cos \delta_n \sin \alpha_n \sin \theta_s \\ + 24 J_2 y_i r_i^4 & - 630 J_4 a_e^2 y_i r_i^2 \sin^4 \theta_s \\ + 420 J_4 a_e^2 y_i r_i^2 \sin^2 \theta_s & + 280 J_4 a_e^2 r_i^3 \cos \delta_n \sin \alpha_n \sin^3 \theta_s \\ - 30 J_4 a_e^2 y_i r_i^2 & - 120 J_4 a_e^2 r_i^3 \cos \delta_n \sin \alpha_n \sin \theta_s \\ - 945 J_6 a_e^4 y_i \sin^2 \theta_s & + 1386 J_6 a_e^4 r_i \cos \delta_n \sin \alpha_n \sin^5 \theta_s \\ + 3465 J_6 a_e^4 y_i \sin^4 \theta_s & - 1260 J_6 a_e^4 r_i \cos \delta_n \sin \alpha_n \sin^3 \theta_s \\ - 3003 J_6 a_e^4 y_i \sin^6 \theta_s & + 35 J_6 a_e^4 y_i \\ + 210 J_6 a_e^4 r_i \cos \delta_n \sin \alpha_n \sin \theta_s \end{array} \right) \\
\frac{\partial R_i}{\partial z_i} = & -\frac{\mu_0 a_e^2}{16 r_i^9} \left(\begin{array}{ll} -120 J_2 z_i r_i^4 \sin^2 \theta_s & + 48 J_2 r_i^5 \sin \delta_n \sin \theta_s \\ + 24 J_2 z_i r_i^4 & - 630 J_4 a_e^2 z_i r_i^2 \sin^4 \theta_s \\ + 420 J_4 a_e^2 z_i r_i^2 \sin^2 \theta_s & - 120 J_4 a_e^2 r_i^3 \sin \delta_n \sin \theta_s \\ - 30 J_4 a_e^2 z_i r_i^2 & + 280 J_4 a_e^2 r_i^3 \sin \delta_n \sin^3 \theta_s \\ - 3003 J_6 a_e^4 z_i \sin^6 \theta_s & + 1386 J_6 a_e^4 r_i \sin \delta_n \sin^5 \theta_s \\ + 3465 J_6 a_e^4 z_i \sin^4 \theta_s & - 1260 J_6 a_e^4 r_i \sin \delta_n \sin^3 \theta_s \\ - 945 J_6 a_e^4 z_i \sin^2 \theta_s & + 35 J_6 a_e^4 z_i \\ + 210 J_6 a_e^4 r_i \sin \delta_n \sin \theta_s \end{array} \right)
\end{aligned}$$

(3.11)

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 R_i}{\partial x_i^2} = & -\frac{\mu_0 a_e^2}{16 r_i^{11}} (\quad - 120 J_2 r_i^6 \sin^2 \theta_s \\
& + 24 J_2 r_i^6 \\
& - 120 J_2 x_i^2 r_i^4 \\
& + 840 J_2 x_i^2 r_i^4 \sin^2 \theta_s \\
& + 48qu'il J_2 r_i^6 \cos^2 \delta_n \cos^2 \alpha_n \\
& - 480 J_2 x_i r_i^5 \cos \delta_n \cos \alpha_n \sin \theta_s \\
& + 210 J_4 a_e^2 x_i^2 r_i^2 \\
& - 630 J_4 a_e^2 r_i^4 \sin^4 \theta_s \\
& + 420 J_4 a_e^2 r_i^4 \sin^2 \theta_s \\
& - 30 J_4 a_e^2 r_i^4 \\
& + 6930 J_4 a_e^2 x_i^2 r_i^2 \sin^4 \theta_s \\
& - 3780 J_4 a_e^2 x_i^2 r_i^2 \sin^2 \theta_s \\
& - 120 J_4 a_e^2 r_i^4 \cos^2 \delta_n \cos^2 \alpha_n \\
& + 840 J_4 a_e^2 r_i^4 \cos^2 \delta_n \cos^2 \alpha_n \sin^2 \theta_s \\
& - 5040 J_4 a_e^2 x_i r_i^3 \cos \delta_n \cos \alpha_n \sin^3 \theta_s \\
& + 1680 J_4 a_e^2 x_i r_i^3 \cos \delta_n \cos \alpha_n \sin \theta_s \\
& + 10395 J_6 a_e^4 x_i^2 \sin^2 \theta_s \\
& - 3003 J_6 a_e^4 r_i^2 \sin^6 \theta_s \\
& + 3465 J_6 a_e^4 r_i^2 \sin^4 \theta_s \\
& - 945 J_6 a_e^4 r_i^2 \sin^2 \theta_s \\
& - 315 J_6 a_e^4 x_i^2 \\
& + 35 J_6 a_e^4 r_i^2 \\
& + 45045 J_6 a_e^4 x_i^2 \sin^6 \theta_s \\
& - 45045 J_6 a_e^4 x_i^2 \sin^4 \theta_s \\
& + 210 J_6 a_e^4 r_i^2 \cos^2 \delta_n \cos^2 \alpha_n \\
& - 36036 J_6 a_e^4 x_i \cos \delta_n \cos \alpha_n r_i \sin^5 \theta_s \\
& + 27720 J_6 a_e^4 x_i \cos \delta_n \cos \alpha_n r_i \sin^3 \theta_s \\
& + 6930 J_6 a_e^4 r_i^2 \cos^2 \delta_n \cos^2 \alpha_n \sin^4 \theta_s \\
& - 3780 J_6 a_e^4 r_i^2 \cos^2 \delta_n \cos^2 \alpha_n \sin^2 \theta_s \\
& - 3780 J_6 a_e^4 x_i r_i \cos \delta_n \cos \alpha_n \sin \theta_s)
\end{aligned} \tag{3.12}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 R_i}{\partial y_i^2} = & -\frac{\mu_0 a_e^2}{16 r_i^{11}} (\quad - 120 y_i^2 J_2 r_i^4 \\
& + 24 r_i^6 J_2 \\
& + 840 y_i^2 J_2 r_i^4 \sin^2 \theta_s \\
& - 120 r_i^6 J_2 \sin^2 \theta_s \\
& + 48 r_i^6 J_2 \cos^2 \delta_n \sin^2 \alpha_n \\
& - 480 y_i J_2 r_i^5 \cos \delta_n \sin \alpha_n \sin \theta_s \\
& + 210 y_i^2 J_4 a_e^2 r_i^2 \\
& - 30 r_i^4 J_4 a_e^2 \\
& + 6930 y_i^2 J_4 a_e^2 r_i^2 \sin^4 \theta_s \\
& - 3780 y_i^2 J_4 a_e^2 r_i^2 \sin^2 \theta_s \\
& - 630 r_i^4 J_4 a_e^2 \sin^4 \theta_s \\
& + 420 r_i^4 J_4 a_e^2 \sin^2 \theta_s \\
& - 120 r_i^4 J_4 a_e^2 \cos^2 \delta_n \sin^2 \alpha_n \\
& + 1680 y_i J_4 a_e^2 r_i^3 \cos \delta_n \sin \alpha_n \sin \theta_s \\
& - 5040 y_i J_4 a_e^2 r_i^3 \cos \delta_n \sin \alpha_n \sin^3 \theta_s \\
& - 315 y_i^2 J_6 a_e^4 \\
& + 35 r_i^2 J_6 a_e^4 \\
& + 45045 y_i^2 J_6 a_e^4 \sin^6 \theta_s \\
& - 45045 y_i^2 J_6 a_e^4 \sin^4 \theta_s \\
& + 10395 y_i^2 J_6 a_e^4 \sin^2 \theta_s \\
& - 3003 r_i^2 J_6 a_e^4 \sin^6 \theta_s \\
& + 3465 r_i^2 J_6 a_e^4 \sin^4 \theta_s \\
& - 945 r_i^2 J_6 a_e^4 \sin^2 \theta_s \\
& + 210 r_i^2 J_6 a_e^4 \cos^2 \delta_n \sin^2 \alpha_n \\
& - 3780 y_i J_6 a_e^4 \cos \delta_n \sin \alpha_n r_i \sin \theta_s \\
& + 840 r_i^4 J_4 a_e^2 \cos^2 \delta_n \sin^2 \alpha_n \sin^2 \theta_s \\
& - 3780 r_i^2 J_6 a_e^4 \cos^2 \delta_n \sin^2 \alpha_n \sin^2 \theta_s \\
& + 6930 r_i^2 J_6 a_e^4 \cos^2 \delta_n \sin^2 \alpha_n \sin^4 \theta_s \\
& - 36036 y_i J_6 a_e^4 r_i \cos \delta_n \sin \alpha_n \sin^5 \theta_s \\
& + 27720 y_i J_6 a_e^4 r_i \cos \delta_n \sin \alpha_n \sin^3 \theta_s)
\end{aligned} \tag{3.13}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 R_i}{\partial z_i^2} = & -\frac{\mu_0 a_e^2}{16 r_i^4} (\quad -480 z_i J_2 r_i^5 \sin \delta_n \sin \theta_s \\
& +840 z_i^2 J_2 r_i^4 \sin^2 \theta_s \\
& +48 r_i^6 J_2 \sin^2 \delta_n \\
& +24 r_i^6 J_2 \\
& -120 r_i^6 J_2 \sin^2 \theta_s \\
& -120 z_i^2 J_2 r_i^4 \\
& +6930 z_i^2 J_4 a_e^2 r_i^2 \sin^4 \theta_s \\
& -5040 z_i J_4 a_e^2 r_i^3 \sin \delta_n \sin^3 \theta_s \\
& -3780 z_i^2 J_4 a_e^2 r_i^2 \sin^2 \theta_s \\
& +840 r_i^4 J_4 a_e^2 \sin^2 \delta_n \sin^2 \theta_s \\
& +1680 z_i J_4 a_e^2 r_i^3 \sin \delta_n \sin \theta_s \\
& +420 r_i^4 J_4 a_e^2 \sin^2 \theta_s \\
& -630 r_i^4 J_4 a_e^2 \sin^4 \theta_s \\
& -30 r_i^4 J_4 a_e^2 \\
& +210 z_i^2 J_4 a_e^2 r_i^2 \\
& -120 r_i^4 J_4 a_e^2 \sin^2 \delta_n \\
& +27720 z_i J_6 a_e^4 r_i \sin \delta_n \sin^3 \theta_s \\
& +10395 z_i^2 J_6 a_e^4 \sin^2 \theta_s \\
& -3780 z_i J_6 a_e^4 r_i \sin \delta_n \sin \theta_s \\
& -3003 r_i^2 J_6 a_e^4 \sin^6 \theta_s \\
& +3465 r_i^2 J_6 a_e^4 \sin^4 \theta_s \\
& -945 r_i^2 J_6 a_e^4 \sin^2 \theta_s \\
& +35 r_i^2 J_6 a_e^4 \\
& -315 z_i^2 J_6 a_e^4 \\
& -3780 r_i^2 J_6 a_e^4 \sin^2 \delta_n \sin^2 \theta_s \\
& +210 r_i^2 J_6 a_e^4 \sin^2 \delta_n \\
& +6930 r_i^2 J_6 a_e^4 \sin^2 \delta_n \sin^4 \theta_s \\
& +45045 z_i^2 J_6 a_e^4 \sin^6 \theta_s \\
& -36036 z_i J_6 a_e^4 r_i \sin \delta_n \sin^5 \theta_s \\
& -45045 z_i^2 J_6 a_e^4 \sin^4 \theta_s)
\end{aligned} \tag{3.14}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 R_i}{\partial x_i \partial y_i} = & -\frac{3 \mu_0 a_e^2}{16 r_i^{11}} (\\
& -40 J_2 y_i x_i r_i^4 \\
& -105 J_6 y_i x_i a_e^4 \\
& +280 J_2 y_i x_i r_i^4 \sin^2 \theta_s \\
& +2310 J_4 y_i x_i a_e^2 r_i^2 \sin^4 \theta_s \\
& -1260 J_4 y_i x_i a_e^2 r_i^2 \sin^2 \theta_s \\
& +70 J_4 y_i x_i a_e^2 r_i^2 \\
& +15015 J_6 y_i x_i a_e^4 \sin^6 \theta_s \\
& -15015 J_6 y_i x_i a_e^4 \sin^4 \theta_s \\
& +3465 J_6 y_i x_i a_e^4 \sin^2 \theta_s \\
& -840 J_4 y_i r_i^3 a_e^2 \cos \delta_n \cos \alpha_n \sin^3 \theta_s \\
& -6006 J_6 y_i r_i a_e^4 \cos \delta_n \cos \alpha_n \sin^5 \theta_s \\
& +4620 J_6 y_i r_i a_e^4 \cos \delta_n \cos \alpha_n \sin^3 \theta_s \\
& -80 J_2 y_i r_i^5 \cos \delta_n \cos \alpha_n \sin \theta_s \\
& +280 J_4 y_i r_i^3 a_e^2 \cos \delta_n \cos \alpha_n \sin \theta_s \\
& -630 J_6 y_i r_i a_e^4 \cos \delta_n \cos \alpha_n \sin \theta_s \\
& -80 J_2 r_i^5 x_i \cos \delta_n \sin \alpha_n \sin \theta_s \\
& -840 J_4 x_i a_e^2 r_i^3 \cos \delta_n \sin \alpha_n \sin^3 \theta_s \\
& +280 J_4 x_i a_e^2 r_i^3 \cos \delta_n \sin \alpha_n \sin \theta_s \\
& -6006 J_6 x_i a_e^4 \cos \delta_n \sin \alpha_n r_i \sin^5 \theta_s \\
& +4620 J_6 x_i a_e^4 \cos \delta_n \sin \alpha_n r_i \sin^3 \theta_s \\
& -630 J_6 x_i a_e^4 \cos \delta_n \sin \alpha_n r_i \sin \theta_s \\
& +16 J_2 r_i^6 \cos^2 \delta_n \cos \alpha_n \sin \alpha_n \\
& +280 J_4 r_i^4 a_e^2 \cos^2 \delta_n \cos \alpha_n \sin \alpha_n \sin^2 \theta_s \\
& -40 J_4 r_i^4 a_e^2 \sin \alpha_n \cos^2 \delta_n \cos \alpha_n \\
& +2310 J_6 r_i^2 a_e^4 \cos^2 \delta_n \cos \alpha_n \sin \alpha_n \sin^4 \theta_s \\
& -1260 J_6 r_i^2 a_e^4 \sin \alpha_n \cos^2 \delta_n \cos \alpha_n \sin^2 \theta_s \\
& +70 J_6 r_i^2 a_e^4 \sin \alpha_n \cos^2 \delta_n \cos \alpha_n)
\end{aligned} \tag{3.15}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 R_i}{\partial x_i \partial z_i} = \frac{3 \mu_0 a_e^2}{16 r_i^{11}} (& - 280 J_4 a_e^2 r_i^4 \cos \delta_n \cos \alpha_n \sin \delta_n \sin^2 \theta_s \\
& - 70 J_4 z_i x_i a_e^2 r_i^2 \\
& + 105 J_6 z_i x_i a_e^4 \\
& - 280 J_4 z_i a_e^2 r_i^3 \cos \delta_n \cos \alpha_n \sin \theta_s \\
& + 40 J_4 r_i^4 a_e^2 \cos \delta_n \cos \alpha_n \sin \delta_n \\
& + 6006 J_6 r_i a_e^4 \cos \delta_n \cos \alpha_n z_i \sin^5 \theta_s \\
& - 2310 J_6 r_i^2 a_e^4 \cos \delta_n \cos \alpha_n \sin \delta_n \sin^4 \theta_s \\
& - 4620 J_6 r_i a_e^4 z_i \cos \delta_n \cos \alpha_n \sin^3 \theta_s \\
& + 1260 J_6 r_i^2 a_e^4 \cos \delta_n \cos \alpha_n \sin \delta_n \sin^2 \theta_s \\
& + 630 J_6 r_i a_e^4 z_i \cos \delta_n \cos \alpha_n \sin \theta_s \\
& - 70 J_6 r_i^2 a_e^4 \cos \delta_n \cos \alpha_n \sin \delta_n \\
& - 280 J_2 x_i r_i^4 z_i \sin^2 \theta_s \\
& + 80 J_2 x_i r_i^5 \sin \delta_n \sin \theta_s \\
& - 2310 J_4 x_i a_e^2 r_i^2 z_i \sin^4 \theta_s \\
& + 840 J_4 x_i a_e^2 r_i^3 \sin \delta_n \sin^3 \theta_s \\
& + 1260 J_4 x_i a_e^2 r_i^2 z_i \sin^2 \theta_s \\
& - 280 J_4 x_i a_e^2 r_i^3 \sin \delta_n \sin \theta_s \\
& - 15015 J_6 x_i a_e^4 z_i \sin^6 \theta_s \\
& + 6006 J_6 x_i a_e^4 r_i \sin \delta_n \sin^5 \theta_s \\
& + 15015 J_6 x_i a_e^4 z_i \sin^4 \theta_s \\
& - 4620 J_6 x_i a_e^4 \sin \delta_n r_i \sin^3 \theta_s \\
& - 3465 J_6 x_i a_e^4 z_i \sin^2 \theta_s \\
& + 630 J_6 x_i a_e^4 \sin \delta_n r_i \sin \theta_s \\
& + 80 J_2 r_i^5 z_i \cos \delta_n \cos \alpha_n \sin \theta_s \\
& - 16 J_2 r_i^6 \cos \delta_n \cos \alpha_n \sin \delta_n \\
& + 840 J_4 z_i a_e^2 r_i^3 \cos \delta_n \cos \alpha_n \sin^3 \theta_s \\
& + 40 J_2 z_i x_i r_i^4)
\end{aligned} \tag{3.16}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 R_i}{\partial y_i \partial z_i} = & -\frac{3 \mu_0 a_e^2}{16 r_i^{11}} (\\
& - 40 J_2 z_i y_i r_i^4 \\
& - 80 J_2 r_i^5 z_i \cos \delta_n \sin \alpha_n \sin \theta_s \\
& + 16 J_2 r_i^6 \sin \delta_n \cos \delta_n \sin \alpha_n \\
& + 280 J_2 y_i r_i^4 z_i \sin^2 \theta_s \\
& - 80 J_2 y_i r_i^5 \sin \delta_n \sin \theta_s \\
& - 1260 J_4 a_e^2 y_i r_i^2 z_i \sin^2 \theta_s \\
& + 280 J_4 a_e^2 y_i r_i^3 \sin \delta_n \sin \theta_s \\
& - 840 J_4 a_e^2 r_i^3 z_i \cos \delta_n \sin \alpha_n \sin^3 \theta_s \\
& + 280 J_4 a_e^2 r_i^4 \cos \delta_n \sin \alpha_n \sin \delta_n \sin^2 \theta_s \\
& + 280 J_4 a_e^2 r_i^3 z_i \cos \delta_n \sin \alpha_n \sin \theta_s \\
& - 40 J_4 a_e^2 r_i^4 \cos \delta_n \sin \alpha_n \sin \delta_n \\
& + 2310 J_4 a_e^2 y_i r_i^2 z_i \sin^4 \theta_s \\
& - 840 J_4 a_e^2 y_i r_i^3 \sin \delta_n \sin^3 \theta_s \\
& + 70 J_4 a_e^2 z_i y_i r_i^2 \\
& + 15015 J_6 a_e^4 y_i z_i \sin^6 \theta_s \\
& - 6006 J_6 a_e^4 y_i \sin \delta_n r_i \sin^5 \theta_s \\
& - 15015 J_6 a_e^4 y_i z_i \sin^4 \theta_s \\
& + 4620 J_6 a_e^4 y_i \sin \delta_n r_i \sin^3 \theta_s \\
& + 3465 J_6 a_e^4 y_i z_i \sin^2 \theta_s \\
& - 630 J_6 a_e^4 y_i \sin \delta_n r_i \sin \theta_s \\
& - 6006 J_6 a_e^4 r_i z_i \cos \delta_n \sin \alpha_n \sin^5 \theta_s \\
& + 2310 J_6 a_e^4 r_i^2 \cos \delta_n \sin \alpha_n \sin^4 \sin \delta_n \theta_s \\
& + 4620 J_6 a_e^4 r_i z_i \cos \delta_n \sin \alpha_n \sin^3 \theta_s \\
& - 1260 J_6 a_e^4 r_i^2 \cos \delta_n \sin \alpha_n \sin \delta_n \sin^2 \theta_s \\
& - 630 J_6 a_e^4 r_i z_i \cos \delta_n \sin \alpha_n \sin \theta_s \\
& + 70 J_6 a_e^4 r_i^2 \cos \delta_n \sin \alpha_n \sin \delta_n \\
& - 105 J_6 a_e^4 z_i y_i)
\end{aligned} \tag{3.17}$$

3.3.4 Conclusion

Ainsi nous obtenons un système d'équations différentielles du second degré. Nous résolvons ce système pour obtenir à chaque instant les positions de chaque satellite, le but étant de connaître la position du satellite à l'instant de chaque observation.

3.4 Ajustement de l'orbite

Dans un premier temps, nous ajustons seulement les conditions initiales de position et de vitesse du satellite sur les observations afin d'améliorer au mieux son orbite. Mais dans la suite nous considérons k paramètres dont les 3 premiers sont les positions et les 3 suivants les vitesses, les autres étant des constantes arbitraires liées au modèle. Ceci afin de considérer le problème général qui nous permettra, par la suite, d'améliorer des valeurs comme la masse ou le 2^{nd} coefficient zonal J_2 ...

3.4.1 Equation aux conditions

Nous disposons de n observations $(\alpha_i^o, \delta_i^o, \iota_i^o)_{i=1\dots n}$ et de k paramètres à améliorer (C_1, \dots, C_k) . Nous mesurons la quantité y à partir des k paramètres, et on note :

$$y = f(C_1, \dots, C_k) \quad (3.18)$$

Les n observations $(y_j^o)_{j=1\dots n}$ sont définies à partir des conditions initiales (C_1^o, \dots, C_k^o) . On les compare aux quantités $(y_j^c)_{j=1\dots n}$ calculées à partir de (C_1^c, \dots, C_k^c) . On obtient :

$$\Delta_j y = y_j^o - y_j^c \quad (3.19)$$

Les $\Delta_j y$ représentent les résidus. Et :

$$\Delta_j C = C_j^o - C_j^c \quad (3.20)$$

Les $\Delta_j C$ représentent les inconnues que nous chercherons à déterminer. Nous écrivons le développement de Taylor :

$$\Delta_j y = \sum_{i=1}^k \left\{ \frac{\partial f_j}{\partial C_i} \Delta C_i + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f_j}{\partial C_i^2} (\Delta C_i)^2 + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 f_j}{\partial C_i^3} (\Delta C_i)^3 + o((\Delta C_i)^3) \right\} \quad (3.21)$$

En supposant que l'on est proche de la solution du problème, on peut négliger les termes d'ordre 2 et supérieur. Nous écrivons l'équation aux conditions qu'il nous faudra inverser :

$$\sum_{i=1}^k \frac{\partial f_j}{\partial C_i} \Delta C_i = \Delta_j y = (O - C)_j \quad (3.22)$$

Les f sont les coordonnées sphériques α ou δ . ΔC est le vecteur définissant des variations infinitésimales des paramètres.

3.4.2 Expression matricielle

Nous avons n observations (α_i^o, δ_i^o) et nous voulons les comparer aux quantités calculées (α_i^c, δ_i^c) à partir de k constantes initiales. Ainsi nous exprimons la matrice Res des résidus par les termes :

$$Res = \begin{bmatrix} \Delta^n \alpha = \alpha_o^n - \alpha_c^n \\ \Delta^n \delta = \delta_o^n - \delta_c^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f^1}{\partial C_1} & \cdots & \frac{\partial f^1}{\partial C_k} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f^{2n}}{\partial C_1} & \cdots & \frac{\partial f^{2n}}{\partial C_k} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta C_1 \\ \vdots \\ \delta C_k \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Ce qui est strictement identique à l'équation (3.22). Nous noterons M , la matrice des dérivées partielles, et ΔC celle des paramètres. Ainsi, les dimensions de chaque matrice sont,

$$\begin{aligned} Res &= \text{Mat}(2n, 1) \\ M &= \text{Mat}(2n, k) \\ \Delta C &= \text{Mat}(k, 1) \end{aligned}$$

3.4.3 Moindres carrés

Nous cherchons à déterminer l'expression de la matrice ΔC qui minimise les résidus. Pour cela nous écrivons,

$$\Delta C = (M^t \cdot M)^{-1} \cdot M^t \cdot Res \quad (3.24)$$

La difficulté se situe dans l'inversion de la matrice carrée $(M^t \cdot M) = \text{Mat}(k, k)$. Selon les valeurs des termes de la matrice M , le problème peut ne pas, ou mal, se résoudre. La méthode utilisée pour inverser la matrice est extraite de Numerical Recipies [22] et se nomme Singular Value Decomposition (SVDFIT). Mais pour cela il nous faut connaître les termes de M .

3.4.4 Matrice des dérivées partielles

Les termes de M sont les $(\frac{\partial \alpha^m}{\partial C_i})$ et $(\frac{\partial \delta^m}{\partial C_i})$ pour $(m = 1..n; i = 1..k)$. Nous les généraliserons par $(\frac{\partial f^j}{\partial C_i})$ pour $(j = 1..2n; i = 1..k)$. Ils peuvent se décomposer suivant les trois composantes du repère de référence dans lequel nous calculons la valeur de chaque vecteur.

$$\frac{\partial f^j}{\partial C_i} = \frac{\partial f^j}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial C_i} + \frac{\partial f^j}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial C_i} + \frac{\partial f^j}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial C_i}$$

ou sous forme matricielle,

$$M = H \cdot A$$

avec

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial C_1} & \cdots & \frac{\partial x}{\partial C_k} \\ \frac{\partial y}{\partial C_1} & \cdots & \frac{\partial y}{\partial C_k} \\ \frac{\partial z}{\partial C_1} & \cdots & \frac{\partial z}{\partial C_k} \end{bmatrix} = \text{Mat}(3, k)$$

et

$$\begin{aligned} H &= \text{Mat}(2n, 3) = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial \alpha^j}{\partial x} \right) & \left(\frac{\partial \alpha^j}{\partial y} \right) & \left(\frac{\partial \alpha^j}{\partial z} \right) \\ \left(\frac{\partial \delta^j}{\partial x} \right) & \left(\frac{\partial \delta^j}{\partial y} \right) & \left(\frac{\partial \delta^j}{\partial z} \right) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \left(-\frac{\sin \alpha^j}{r \cos \delta^j} \right) & \left(\frac{\cos \alpha^j}{r \cos \delta^j} \right) & (0) \\ \left(-\frac{\sin \alpha^j \cos \delta^j}{r} \right) & \left(-\frac{\sin \alpha^j \sin \delta^j}{r} \right) & \left(\frac{\cos \delta^j}{r} \right) \end{bmatrix}_{(j=1..n)} \end{aligned} \quad (3.25)$$

Les termes entre parenthèses représentent des sous matrices de dimension $(n,1)$. Nous calculons facilement la matrice H , il nous reste à exprimer la matrice A .

3.4.5 Calcul de la matrice A (Forme simplifiée)

Jusqu'à présent nous avons considéré les $(C_1..C_k)$ comme des paramètres quelconques. Mais nous verrons dans la section suivante que la résolution du problème général n'est pas si simple. Nous allons considérer dans ce paragraphe les conditions du problème actuel : Les k paramètres à améliorer $(C_1..C_k)$ sont indépendants du temps et ne sont pas des variables explicites dans le membre de droite de l'équation (3.7). Ce sont les (C_1, \dots, C_6) définissant les positions et les vitesses à l'instant initial. A noter que les (C_1, \dots, C_6) apparaissent de manière explicite dans les équations seulement à l'instant initial.

Notations

Notons tout d'abord, pour simplifier les calculs matriciels qui vont suivre,

$$\begin{aligned} (x_1, x_2, x_3) &= (x, y, z) \\ A_j^n &= \frac{\partial x_n}{\partial C_j} \quad \text{avec} \quad (n = 1..3; j = 1..6) \\ G_n^i &= \frac{\partial F_i}{\partial x_n} \quad \text{avec} \quad (i = 1..3; n = 1..3) \end{aligned} \quad (3.26)$$

Les F_i représentent le membre de droite de l'équation (3.7) relative au satellite intégré.

Remarques

1. L'équation (3.7) s'écrit,

$$\frac{d^2 \mathbf{r}_1}{dt^2} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix}$$

2. L'équation (3.7) est indépendante des vitesses. D'où,

$$\frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}_n} = 0 \quad (3.27)$$

3. Nous déduisons de $\frac{\partial r}{\partial x_i} = \frac{x_i}{r}$ et de $\frac{\partial^2 R}{\partial x_j \partial x_i} = \frac{\partial^2 R}{\partial x_i \partial x_j}$ la symétrie suivante,

$$\frac{\partial F_i}{\partial x_n} = \frac{\partial F_n}{\partial x_i} \quad (3.28)$$

4. Le temps n'est pas une variable explicite dans les F_i .

Dérivée 2^{nde} de A

Dans les conditions explicitées ci-dessus nous pouvons écrire,

$$\begin{aligned}
\ddot{A}_j^i &= \frac{d^2}{dt^2} (A_j^i) \\
&= \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{\partial x_i}{\partial C_j} \right) \\
&= \frac{\partial}{\partial C_j} \left(\frac{d^2 x_i}{dt^2} \right) \\
&= \frac{\partial F_i}{\partial C_j} \\
&= \sum_{n=1}^3 \left(\frac{\partial F_i}{\partial x_n} \frac{\partial x_n}{\partial C_j} + \frac{\partial F_i}{\partial \dot{x}_n} \frac{\partial \dot{x}_n}{\partial C_j} \right) \\
&= \sum_{n=1}^3 \frac{\partial F_i}{\partial x_n} \frac{\partial x_n}{\partial C_j} \\
&= \sum_{n=1}^3 G_n^i \cdot A_j^n
\end{aligned} \tag{3.29}$$

Nous obtenons un système d'équations différentielles du 2^{nd} ordre à résoudre. Les conditions initiales de ce système sont simples et s'écrivent :

$$A_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \dot{A}_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.30}$$

Ainsi nous pourrons calculer aussi pas à pas, par intégration numérique, les éléments des matrices A et M . A l'instant final d'intégration nous sommes en mesure d'inverser la matrice M . Nous obtenons les corrections nécessaires à apporter aux positions et vitesses initiales afin de minimiser les résidus.

3.4.6 Le problème général d'un paramètre quelconque

Dépendance dans les équations du mouvement

Dans le cas présent d'intégration du mouvement d'un satellite interne de Jupiter, le membre de droite des équations (3.7) dépend des quantités suivantes :

Explicitement

- Positions de chaque corps à l'instant t .
- Coefficients zonaux d'aplatissement de la planète, J2, et J4.
- Masse de chaque corps, m_0, \dots, m_7 .
- Rayon équatorial moyen de la planète, a_e .
- Coordonnées sphériques du pôle nord de Jupiter, α_N, δ_N .
- Constante gravitationnelle de Gauss, k .

Indirectement

- Position et vitesse initiale de chaque satellite à l'instant t_i , début de l'intégration.

Propriétés des paramètres

Il existe différentes sortes de constantes grâce auxquelles nous pourrons ajuster l'orbite.

1. Les positions et vitesses initiales du satellite intégré à une époque donnée. Elles sont indépendantes du temps et ne sont pas explicites dans les F_i , sauf à l'instant initial.

2. Les positions et vitesses initiales d'un autre satellite agissant sur le mouvement du satellite intégré.
3. Les constantes agissant sur le mouvement du satellite intégré, mais non sur les autres satellites. Par exemple la masse du satellite intégré. Nous supposons que le satellite intégré n'agit pas sur la dynamique des autres satellites et que lors de l'ajustement nous sommes proche de la solution. Elles sont indépendantes du temps, mais elles sont explicites dans les F_i .
4. Les constantes agissant sur le mouvement du satellite intégré et sur d'autres satellites. exemple le J_2 . Elles sont indépendantes du temps, mais elles sont explicites dans les F_i . De plus la modification de ces constantes entraîne un mouvement différent pour chaque satellite dépendant de ces constantes.

3.4.7 Résumé des tâches effectuées par le programme

Calcul des résidus

- Représentation des équations du mouvement par une procédure.
- Résolution du système de n équations différentielles du 2^{nd} ordre en résolvant un système de $2n$ équations du 1^{er} ordre. Méthode d'intégration pas à pas, à partir d'une date de condition initiale. La date de fin d'intégration étant la dernière observation. Nous utilisons la méthode de Gramm-Bulirsch-Stoer pour extrapoler la valeur à l'instant suivant. La méthode provient du Numerical Recipies [22] que nous avons réécrite en Fortran 90.
- Comparaison avec l'observation et obtention des résidus.

Ajustement de l'orbite

L'ajustement de l'orbite se réalise en minimisant les résidus. Une petite modification de certains paramètres définissant l'orbite (comme les conditions initiales) entraîne une modification de l'orbite et donc des résidus. On résout les équations aux conditions et on minimise par moindres carrés les résidus pour obtenir les corrections ($\Delta_j C$) nécessaires des conditions initiales.

Le calcul des éléments de M se fait en même temps que celui des résidus. Nous résolvons en bloc de l'instant t_k à l'instant t_{k+1} , 72 équations différentielles du premier ordre. Ce qui correspond à 36 équations du second ordre. Puisque l'on a 3 positions pour 6 corps, et 6 conditions initiales agissant sur les 3 positions de l'espace.

Lorsque tous les termes de la matrice M sont calculés, on inverse la matrice par Singular Value Decomposition [22] pour obtenir les $\Delta_j C$.

3.5 Calcul de la force de perturbation créée par le champ magnétique de la planète.

Les forces explicitées ci-dessus sont des forces de nature gravitationnelle. Par la complexité de l'environnement de Jupiter, il peut cependant exister d'autres forces d'origine non-gravitationnelle. Notamment, une force induite par le champ magnétique de la planète.

J'ai utilisé les recherches de Anselmo et Farinella [23] sur les ondes d'Alfven pour des satellites orbitant dans les anneaux de plasma de Jupiter. Si on note \mathbf{B} le champ magnétique de la planète, \mathbf{V} la vitesse du conducteur et c la vitesse de la lumière, il est induit une charge électrique interne dans un conducteur évoluant dans le plasma, tel que :

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{V} \cdot \mathbf{B}}{c} \quad (3.31)$$

Un courant continu traverse le corps et une partie de l'énergie mécanique est transformée en "radiation Alfven". Tout rayonnement électromagnétique peut être décomposé en radiations monochromatiques, dont chacune est due à un phénomène périodique, sinusoïdal, qui se propage. Chaque radiation simple est caractérisée par la fréquence de ce phénomène. Une onde d'Alfven est une perturbation hydrodynamique de fréquence ω inférieure à une valeur limite ω^+ .

$$\omega < \omega^+ = 10^4 \cdot B \frac{M_p}{M_i} (\text{Hz}) \quad (3.32)$$

Où, M_p est la masse du proton, M_i la masse d'un ion composant le plasma. Un corps de taille D et de vitesse v rayonne à une fréquence de l'ordre de $\frac{v}{D}$. Pour que l'effet des ondes d'Alfven soit important il faut que la taille de l'objet soit supérieur à une taille limite D^- :

$$D > D^- = 10^{-4} \frac{v M_i}{B M_p} \quad (3.33)$$

Pour un champ de force $B = 1$ Gauss, une vitesse de l'objet de 10^4 m/s et un taux ion/proton ($\frac{M_i}{M_p}$) égal à 1, la taille du corps doit être supérieure à 1 mètre.

3.5.1 Energie dissipée

On note V_A la vitesse Alfven suivant la formule :

$$V_A = c \left(1 + \frac{4\pi\rho c^2}{B^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3.34)$$

Avec ρ la densité de masse du plasma. Dans le cas où $V_A \ll c$ on obtient :

$$V_A = \frac{B}{\sqrt{4\pi\rho}} \quad (3.35)$$

On calcule le taux de dissipation de l'énergie P par :

$$P = \frac{B^2 V^2}{2\pi V_A} D^2 \quad (3.36)$$

3.5.2 Hypothèses

Notons la conductivité critique σ_{cr} :

$$\sigma_{cr} = \frac{c^2}{2\pi DV_A} \quad (3.37)$$

La fréquence du plasma ω_p :

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_e}{m_e}} \quad (3.38)$$

e est la charge de l'électron, n_e la densité du nombre d'électrons, et m_e la masse de l'électron. Et la dimension limite L :

$$L \equiv \frac{c}{\omega_p} \quad (3.39)$$

Les hypothèses suivantes vont nous permettre, si elles sont remplies, de calculer une force d'Alfven de perturbation en fonction de la vitesse de l'objet.

- ▶ Nous sommes dans un régime linéaire c'est à dire $v \ll V_A$.
- ▶ σ la conductivité électrique du corps est plus grande que la valeur critique σ_{cr} .
- ▶ Le plasma est dit "loss-less" ou "collision-free" c'est à dire que $D < L$.

A $1.8 R_J^4$, $B \simeq 0.7G$ sur le plan équatorial (Acuna et Ness 1976 [24]), la densité de masse du plasma $\rho \simeq 10^{-20} gcm^{-3}$ (Burns et al 1980), La vitesse Alfven a pour valeur $V_A \simeq 2.10^7 ms^{-1}$, la conductivité critique $\sigma_{cr} \simeq \frac{8.10^{-5}}{D} \Omega^{-1} m^{-1}$, la fréquence du plasma $\omega_p \simeq 6.10^5 Hz$, la densité électronique $n_e \simeq 10^2 cm^{-3}$, la taille limite pour l'hypothèse "collision-free" $L \simeq 500m$. La taille minimum du satellite varie de 1.2 km à 40 km suivant la composition du plasma en H^+, O^+ ou S^+ .

3.5.3 Effet sur la dynamique

Les effets de l'électro-magnéto-hydrodynamique sur les satellites étant non trivial, j'ai majoré la majeure partie des équations pour obtenir une valeur maximale d'une force qui peut s'exprimer dans les équations de la dynamique. La radiation Alfven s'exprime comme une perte d'énergie dans l'énergie mécanique, donc je représente la force comme un vecteur tangent à la vitesse du corps et dans le sens inverse de son mouvement. Après avoir calculé P le taux de dissipation de l'énergie, je calcule la force suivant les 3 axes de l'espace par :

$$\mathbf{F}_{\text{Drag}} = -\frac{P\mathbf{V}}{V^2} \quad (3.40)$$

3.5.4 Comparaison avec l'intégration numérique

Pour comparer l'effet de cette force, j'ai calculé la différence en position, d'un satellite intégré, avec et sans force d'Alfven sur une durée de 20 ans. Pour Amalthée et Thébé je n'ai obtenu aucun résultat significatif dans l'évolution de leur mouvement et la différence était nulle.

⁴ R_J rayon de Jupiter $\simeq 71492$ kilomètres.

3.6 Extrapolation d'orbites

3.6.1 Les équations et les paramètres internes

J'ai utilisé pour modéliser l'orbite des satellites la méthode de Gramm, Bulirsch et Stoer. Cette méthode donne des résultats satisfaisants, lorsqu'on désire des solutions avec une grande précision aux équations différentielles ordinaires. L'algorithme est à pas variable. C'est à dire que pendant l'extrapolation, l'algorithme ajuste son pas d'intégration en fonction de la précision demandée. Notre problème s'applique à la résolution d'une matrice de n équations différentielles du deuxième ordre dont le coefficient devant le terme de premier ordre est nul. Nous pouvons résoudre ce problème en utilisant une nouvelle variable. Ce qui va nous permettre d'écrire un système d'équations différentielles du premier ordre équivalent. Considérons un système de n équations différentielles ordinaires du second ordre :

$$\frac{d^2 y_n}{dx^2} + q(x)y_n = r(x) \quad (3.41)$$

Nous pouvons par un jeu d'écriture résoudre le système équivalent d'une matrice de $2n$ équations différentielles du premier ordre, en écrivant :

$$\begin{aligned} z_n(x) &= \frac{dy_n}{dx} \\ \frac{dz_n}{dx} &= r(x) - q(x)y_n \end{aligned} \quad (3.42)$$

Cette écriture nous permet de résoudre un système de $2n$ équations du premier ordre.

Mais résoudre une équation du mouvement n'est pas restreint au calcul de la position du corps, il est aussi bien souvent nécessaire d'en connaître sa vitesse. La période des satellites est extrêmement courte, inférieure à une journée terrestre, et pourtant les satellites parcourent de grandes distances⁵. C'est pourquoi le pas d'intégration peut être extrêmement court puisque l'algorithme pour un pas donné doit garder une précision interne validant les résultats en sortie. L'algorithme de Gramm, Bulirsch et Stoer est une méthode à pas variable. Donc nous devons pour initialiser le programme, lui donner un pas initial (dans notre cas un centième de la période du satellite) et une précision interne ϵ que devra respecter le programme à chaque pas. Il ajustera ensuite la longueur du pas en fonction de ϵ .

3.6.2 L'algorithme de Bulirsch et Stoer

L'algorithme de Gramm, Bulirsch et Stoer [25] utilise les fonctions de Gramm $S(x, h)$ que nous définissons par :

Pour un triplet donné (f, x_0, y_0) , un réel H , et un entier naturel $n > 0$, on définit $\bar{x} = x_0 + H$ et $h = H/n$. Pour le problème suivant :

$$\begin{aligned} y' &= f(x, y) \\ y(x_0) &= y_0 \end{aligned} \quad (3.43)$$

Avec la solution exacte $y(x)$, on définit la valeur de $S(\bar{x}, h)$ par

⁵1.4 millions de kilomètres en 0.67 jour terrestre pour Thébé

$$\begin{aligned}
\text{Etape 1 :} \quad & \eta_0 = y_0 \\
& \eta_1 = \eta_0 + hf(x_0, \eta_0) \\
& x_1 = x_0 + h \\
\text{pour } j = 1, \dots, n-1 : & \eta_{j+1} = \eta_{j-1} + 2hf(x_j, \eta_j) \\
& x_{j+1} = x_j + h \\
& S(\bar{x}, h) = \frac{1}{2}[\eta_n + \eta_{n-1} + hf(x_n, \eta_n)]
\end{aligned} \tag{3.44}$$

Ensuite il nous faut une séquence de nombres pour l'évaluation du pas d'intégration. Cette séquence est choisie comme étant une suite de nombres naturels strictement croissante habituellement de la forme $F = \{2, 4, 6, 8, 12, 16, \dots\}$, $n_i = 2n_{i-2}$ pour $i \leq 1$. Une fois cette séquence choisie nous pouvons définir une succession de pas tel que : $h_i = H/n_i$ avec $h_0 = H$. Enfin, à chaque pas h_i on définit les nombres $T_{i,k}$ tel que :

$$\begin{aligned}
& T_{i,0} = S(\bar{x}, h_i) \\
T_{i,k} = T_{i,k-1} + & \frac{T_{i,k-1} - T_{i-1,k-1}}{[\frac{h_i - k}{h_i}]^2 - 1}, 1 \leq k \leq i
\end{aligned} \tag{3.45}$$

Ils montrent enfin, que pour un k donné la série $T_{i,k}$ converge :

$$\lim_{i \rightarrow +\infty} T_{i,k} = y(\bar{x}) \tag{3.46}$$

Et l'erreur $T_{i,k} - y(\bar{x})$ peut être estimée par le calcul des $T_{i,k}$. Ainsi, quatre paramètres seront importants lors de l'intégration par cette méthode. Le premier est le choix de H qui est l'intervalle de départ. Si on le choisit trop grand, la table des nombres calculés risque de dépasser l'espace de la mémoire physique de l'ordinateur. Ce deuxième paramètre est l'espace mémoire alloué au calcul de cette table.

Le troisième paramètre ϵ est l'erreur permise par l'algorithme. Il va définir à quel pas on peut borner la série $T_{i,k} - y(\bar{x}) \leq \epsilon$. Enfin, le dernier paramètre, est lié aux trois premiers puisqu'il définit le pas minimum autorisé. Il fournit le nombre maximal de la séquence des nombres de F .

Chapitre 4

Comparaisons : Modèles et Observations

Anno 1617.

Motus Planerarum

Marcij

Anno	Die	Longi. Gr. Ms.	h		2		c		o		p		Longi. Gr. Ms.	Longi. Gr. Ms.	Longi. Gr. Ms.	Longi. Gr. Ms.	Longi. Gr. Ms.	Longi. Gr. Ms.				
			h	m	h	m	h	m	h	m	h	m							h	m		
19	1	6.17	15	23	24	11	14	5	2	11.12	3	17	58	10	6	49	29	21	8	4	57	46
20	2	6.23	15	23	35	11	14	32	15	12.12	8	19	9	11	8	32	40	4	39	4	22	42
21	3	6.33	14	23	46	11	14	13	10	13.12	10	20	21	11	0	11	5	18	34	1	32	39
22	4	6.34	14	23	57	11	13	54	5	14.12	10	21	22	11	1	27	1	25	7	22	36	36
23	5	6.40	14	24	8	11	13	35	6	15.12	6	22	44	11	2	58	26	17	42	1	10	33
24	6	6.45	14	24	19	11	13	17	3	16.12	0	23	55	11	4	13	40	2	0	13	36	36
25	7	6.51	13	24	30	11	12	59	1	17.11	53	25	6	11	5	22	7	17	48	1	33	37
26	8	6.57	13	24	42	11	12	42	3	18.11	42	26	17	2	6	22	13	2	57	2	23	23
27	9	7. 3	13	24	53	11	12	25	57	19.11	30	27	28	2	7	13	23	17	59	3	54	20
28	10	7. 9	13	25	4	11	12	8	24	20.11	16	28	39	2	7	59	14	2	4	40	17	14
1	11	7.15	13	25	15	11	12	53	12	21.11	1	29	50	1	8	42	41	17	8	5	7	14
2	12	7.22	13	25	26	11	12	38	50	22.10	43	1	0	1	9	1	47	11	6	5	11	11
3	13	7.28	13	25	36	11	12	24	48	23.10	24	2	11	4	9	57	31	14	24	5	4	7
4	14	7.34	13	25	47	11	12	12	4	24.10	1	3	21	4	10	18	53	17	16	4	4	4
5	15	7.41	13	25	58	11	12	1	0	25.9	36	4	32	4	10	24	34	9	51	4	2	2
6	16	7.47	13	26	8	11	12	0	49	26.9	10	5	43	5	10	20	53	23	13	3	13	3
7	17	7.54	13	26	18	11	12	0	39	27.8	41	6	52	5	10	12	55	4	25	2	16	5
8	18	8. 1	13	26	28	11	12	0	29	28.8	0	8	2	59	9	5	52	16	31	3	14	5
9	19	8. 7	13	26	37	11	12	0	20	29.7	18	9	11	1	9	27	53	28	28	0	10	4
10	20	8.13	13	26	47	11	12	0	11	30.6	53	10	22	6	8	56	53	10	22	0	1	4
11	21	8.20	13	26	57	11	12	0	3	1.6	53	11	32	10	8	18	34	23	13	3	57	4
12	22	8.26	13	27	6	11	12	0	27	2.5	16	12	41	14	7	37	31	4	5	2	54	39
13	23	8.33	13	27	15	11	12	0	18	3.4	57	13	51	17	6	53	48	16	1	3	44	19
14	24	8.40	13	27	24	11	12	0	9	4.4	13	15	0	21	6	5	44	28	0	24	33	3
15	25	8.47	13	27	33	11	12	0	2	5.2	26	16	9	25	5	15	37	10	0	13	29	3
16	26	8.54	13	27	42	11	12	0	18	6.2	35	17	18	28	4	24	29	22	2	5	26	3
17	27	9. 1	13	27	50	11	12	0	10	7.1	45	18	27	32	3	32	21	4	5	1	23	3
18	28	9. 8	13	27	59	11	12	0	14	8.0	49	19	26	36	2	41	12	17	39	4	5	2
19	29	9.15	13	28	8	11	12	0	13	8.59	53	20	45	39	1	51	2	0	5	3	26	17
20	30	0.22	9	28	17	14	19	10	9	0.58	56	21	53	43	1	1	50	13	5	4	7	1
1	31	9.30	9	28	26	14	19	31	11	10.57	58	22	1	47	0	1	48	27	2	4	5	1

Die 3. mane ☿ nondum erat inter cor & cervicem Leonis, & p̄ca jani transiverat.
 Dies. Martij inter Zwerda & Helmsfeld, occidit Luna habens a sinistra Mercurium, paulo altiores in suo margine, & videbatur linea ex Mercurio extremis Lunae comibus parallelâ incidens, incidere in partem Lunae obcuram, sic ut aliquotam diametri partem intercepte, forte quatuor. Diffabara prop. on. utriusque manus diametro Lunae. Die 18. H. 7. linea per comas ☽ videbatur quodammodo ultra Martem.

4.1 Introduction

Après avoir introduit un outil comme l'extrapolation d'orbites, il nous est possible maintenant de faire certaines comparaisons. Les premières, évidentes, sont les comparaisons aux observations qui vont nous permettre de voir le comportement de l'intégrateur et d'ajuster le modèle sur les observations afin de représenter au mieux la réalité. Puis, on peut comparer cet outil avec d'autres modèles pour vérifier la validité ou pour comprendre son comportement numérique. Enfin, nous allons classifier les forces impliquées dans le modèle pour comprendre l'environnement gravitationnel qui règne dans le voisinage de la planète Jupiter.

4.2 Les effets physiques faibles sur le mouvement des satellites

Le but ici est de faire un bilan des forces appliquées à chaque satellite. Le problème des deux corps s'applique lorsqu'un satellite est attiré par une force centrale. Les forces supplémentaires qui s'appliquent aux satellites perturbent le problème des deux corps de manière à ce que l'orbite du satellite s'écarte de façon périodique du modèle de référence. J'ai choisi comme référence de considérer le problème complet des forces s'appliquant sur chaque satellite et de supprimer à tour de rôle une force pour en évaluer l'effet en mesurant la différence avec le problème complet. Pour chaque force la valeur extraite est l'amplitude maximale de l'écart des deux modèles exprimé en kilomètres puis en pourcentage en comparaison avec la force perturbatrice principale, le J2 de Jupiter.

$$Diff = \sqrt{(x - x_{ref})^2 + (y - y_{ref})^2 + (z - z_{ref})^2} \quad (4.1)$$

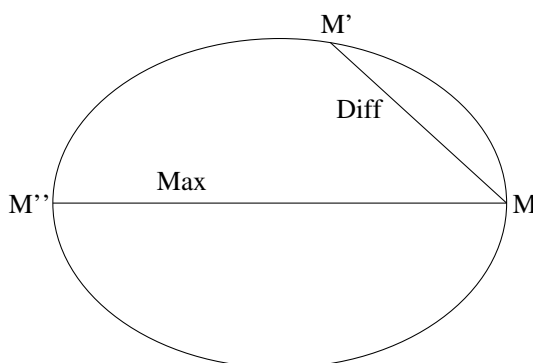


FIG. 4.1: Le point M définit la position de référence du satellite avec le modèle complet. Le point M' est la position du satellite en supprimant une force du modèle. $Diff$ exprime la différence en position définie dans l'équation 4.1. Certaines forces comme l'effet du J2 ou du J4 sont si influentes qu'après un certain temps le point M' est en M'' .

Le résultat le plus intéressant est que ces satellites sont perturbés en premier lieu par le champ de gravitation de la planète pour les harmoniques J2 et J4. Ensuite du fait

TAB. 4.1: Classification des perturbations pour Amalthee and Thébé.

a. Perturbations d'Amalthee			b. Perturbations de Thébé		
Effets	% de J2	Km	Effets	% de J2	Km
J2	100	Max	J2	100	Max
J4	1.1	Max	J4	0.83	0.25e+06
Io	0.20	0.11e+06	Io	0.21	0.65e+05
Europe	0.39e-01	0.22e+05	Europe	0.84e-01	0.25e+05
Ganymède	0.14e-01	0.83e+04	Ganymède	0.18e-01	0.56e+04
J6	0.12e-01	0.69e+04	Callisto	0.10e-01	0.32e+04
Callisto	0.36e-02	0.21e+04	J6	0.63e-02	0.19e+04
Soleil	0.87e-03	0.50e+03	Soleil	0.20e-02	0.62e+03
Thébé	0.86e-04	0.47e+02	Amalthee	0.12e-02	0.38e+03
Relativité	0.96e-06	0.54e+00	Saturne	0.16e-05	0.48e+00
Saturne	0.51e-06	0.29e+00	Relativité	0.15e-06	0.45e-01

de sa proximité, le satellite Io est le premier corps perturbateur. Pour les effets les plus faibles, on peut se poser la question de l'utilité de considérer les perturbations des autres planètes si on fait la comparaison avec la précision que nous donne l'algorithme de calcul. Il est intéressant de noter que la masse des satellites proches peut intervenir avant une correction de la relativité. Mais l'incidence sur les résidus sera extrêmement faible puisque 1 kilomètre à 4 unités astronomiques (à l'opposition, dans le meilleur des cas) fait une différence de 0.35 mas. Les résidus moyens sur les observations sont de l'ordre de 200 mas il n'est donc pas nécessaire de prendre en compte les perturbations mutuelles des satellites Amalthee et Thébé, ainsi que l'influence de Saturne et la correction relativiste.

4.3 Précisions des algorithmes

4.3.1 vitesse de l'algorithme

Pour comparer les différentes méthodes d'intégration, on fixe comme référence le calcul en double précision et pour une valeur de $\epsilon = 10^{-14}$ la variable qui définit la précision de calcul pour chaque pas d'intégration. Ensuite, je calcule la différence en kilomètres par rapport aux autres méthodes de calcul et pour différentes valeurs de ϵ . La recherche de la précision des calculs implique un temps de calcul plus long et on peut voir sur la table 4.2 qu'en double précision le gain est relativement faible par rapport au temps de calcul, lorsqu'on dépasse des valeurs de $\epsilon = 10^{-16}$. Ici, seulement les différences en position sont représentées et la période de 10 révolutions de Thébé est relativement courte. D'autres variables comme les dérivées partielles en fonction des conditions initiales n'ont pas le même comportement que la position du corps et les calculs sont bien plus nombreux. Ce qui implique une déviation beaucoup plus importante. Mais l'utilisation de l'algorithme peut être différente si on veut fournir une éphéméride ou si on veut ajuster une variable, et la période de calcul est toute aussi importante. [Pour l'ajustement du mouvement de Thébé sur une période de 30 années avec un calcul en quadruple précision et une valeur de $\epsilon = 10^{-16}$, le calcul aura mis 140 heures par itération sur une machine IBM Risc 6000¹.] Le calcul des résidus de Thébé pour la même période d'observations avec un calcul en double

¹Risc 6000 modèle F50 Quadri-pro (RS64 Power III 332Mhz) 3Go RAM.

précision et une valeur de $\epsilon = 10^{-15}$ aura mis 75 heures. L'acquisition d'une nouvelle machine² de calcul aura permis de diviser ce temps de calcul par 2.5.

TAB. 4.2: Vitesse de Calcul pour un problème complet, suivant la méthode d'intégration, sur 10 périodes. La référence est le calcul en double précision pour une valeur de $\epsilon = 10^{-14}$.

a. Calcul en double précision

ϵ	temps (sec) d'intégration	différence en position (km)	différence en vitesse (km/s)
1.E-10	4.85	0.296E-02	0.119E-01
1.E-11	5.75	0.296E-02	0.119E-01
1.E-12	6.75	0.145E-03	0.575E-03
1.E-13	7.88	0.330E-04	0.145E-03
1.E-14	10.96	0.000E-00	0.000E-00
1.E-15	28.25	0.407E-04	0.162E-03

b. Calcul en quadruple précision

ϵ	temps (sec) d'intégration	différence en position (km)	différence en vitesse (km/s)
1.E-10	5.75	0.633E-01	0.254E-00
1.E-11	6.81	0.289E-02	0.116E-01
1.E-12	7.99	0.133E-03	0.533E-03
1.E-13	9.36	0.126E-06	0.235E-05
1.E-14	12.59	0.427E-04	0.169E-03
1.E-15	34.77	0.277E-04	0.111E-03
1.E-16	142.92	0.302E-04	0.121E-03
1.E-17	675.28	0.313E-04	0.125E-03

4.3.2 Aller-retour et problème des deux corps

La méthode la plus simple pour vérifier l'erreur que commet l'intégrateur est d'effectuer un aller-retour. C'est à dire, partant d'une position x_0 à un instant t_0 on intègre jusqu'à un temps $t_0 + \tau$ à la position x_1 puis on se sert de la position x_1 à l'instant $t_0 + \tau$ comme condition initiale pour calculer à l'instant t_0 la position $x_0 + \Delta x$. La valeur Δx ainsi obtenue montre la déviation de l'algorithme au cours du temps 2τ .

Le problème des deux corps donne par les lois de Kepler une solution simple de résolution des équations du mouvement. Il est utile de comparer l'algorithme d'intégration à ce problème simplifié pour détecter d'éventuelles erreurs, commises dans le code source. Mais son intérêt est restreint par rapport à l'aller-retour puisque l'algorithme d'intégration est simplifié dans ce cas au problème des deux corps. Donc il ne prend pas en compte les perturbations et il fournit des comparaisons seulement sur les positions et vitesses du satellite. Néanmoins, cela peut fournir une information sur la troncature des nombres par la machine. Le nombre d'opérations élémentaires est énorme puisqu'il effectue des calculs pas à pas, alors que l'équation de Kepler donne la position et la vitesse à tout instant en quelques opérations. Un calcul effectué en double précision avec $\epsilon = 10^{-14}$ s'écarte de 1 km du problème des deux corps au bout de 870 périodes du satellite Thébé.

²Risc 6000 modèle PSeries 6F1 Quadri-pro (RS64 Power IV 750Mhz) 4Go RAM.

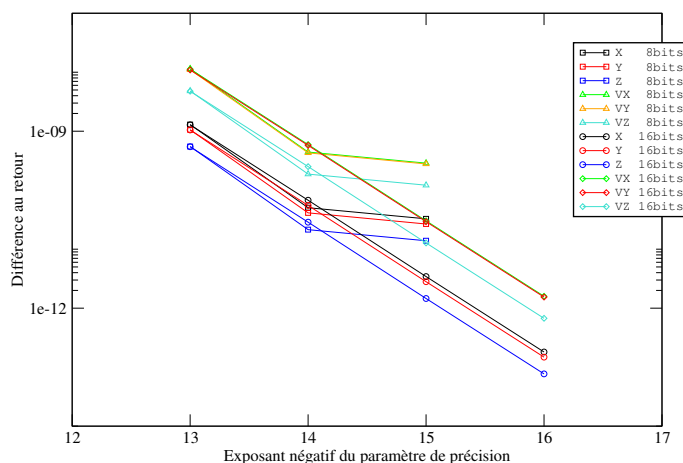


FIG. 4.2: Comparaison des méthodes d'intégration pour différentes valeurs du paramètre de précision ϵ . Pour un calcul en double précision on peut voir très clairement un palier sur la précision du modèle. Ceci est dû à la limite de précision $\epsilon_{machine}$ des calculs en double précision.

4.3.3 Comparaison avec une méthode analytique

En collaboration avec Nicolai Emelianov³, nous avons ajusté une autre méthode de calcul sur un ensemble de points fournis par l'intégration numérique. Le modèle de N. Emelianov est un modèle analytique du mouvement d'un satellite, basé sur une orbite intermédiaire, complétée par la prise en compte du J2 et une partie du J4 et du J6 de la planète. Après avoir écrit les formules analytiques, il ajuste les paramètres sur des positions fournies par l'intégration numérique. Les perturbations séculaires et celles de courtes périodes sont calculées jusqu'au troisième ordre. L'écart entre la solution théorique et numérique est de l'ordre de la perturbation liée au J6 de la planète. Les perturbations en éléments sont des fonctions soit périodiques, soit séculaires. La théorie entière est décrite dans l'article (Emelianov N. 1986 [26]) pour le mouvement d'un satellite artificiel de la Terre perturbé par la non-sphéricité de la planète (J2, J4, ... C22, S22, C31, S31 ...). Mais du fait de la présence rapprochée des satellites galiléens, cette théorie ne s'applique pas aussi précisément dans le cas de Thébé et Amalthée.

En ce qui concerne l'ajustement des paramètres orbitaux sur la solution numérique, les coordonnées planétocentriques rectangulaires sont prises comme des observations et la méthode des moindres carrés fournit les conditions initiales en minimisant la différence obtenue pour chaque date suivant la formule 4.1. On obtient pour Thébé, une différence moyenne sur les positions d'environ 0.01466 km sur une période de 200 jours. Ces résultats confirment que les perturbations J2 et J4, liées à l'aplatissement de la planète sont suffisamment bien représentées dans le modèle numérique. Par contre, le fait que l'effet du J6 ne soit pas significatif montre les limites numériques du problème. En effet, ajouter au modèle des effets de l'ordre du J6 ou inférieurs, augmente le nombre de calculs élémentaires mais n'apporte pas des corrections suffisantes pour l'amélioration du modèle. De plus, un modèle numérique a tendance à dévier assez rapidement lorsque l'on s'éloigne de l'intervalle où les données ont été ajustées.

³Sternberg Astronomical Institute, Moscow University

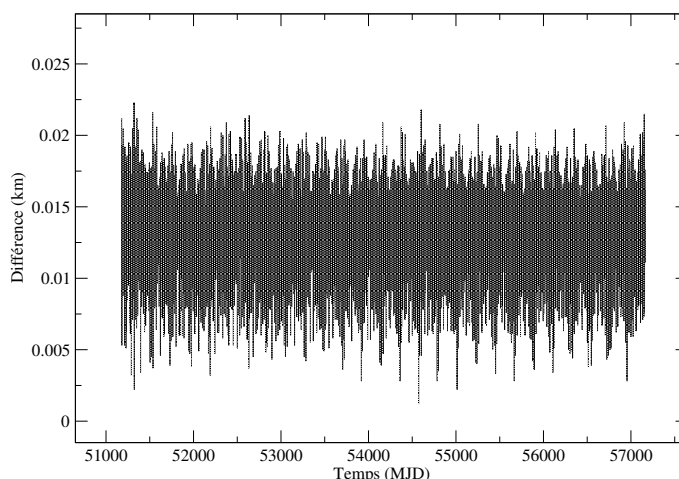


FIG. 4.3: Comparaison du modèle numérique à une solution analytique de Thébé, ajusté sur la solution numérique pour une période de 200 jours.

4.4 Classification des observations

Pour calculer les résidus, il est nécessaire de mettre les positions observées et calculées dans un même système de coordonnées. J'ai choisi de conserver les observations sous leur forme originelle pour éviter l'ajout d'erreurs systématiques. Les observations se présentent sous diverses formes tantôt dans un repère apparent tantôt dans un repère astrométrique. Les coordonnées relatives ont pour référence la planète, un satellite galiléen ou Amalthée lorsqu'il s'agit d'un autre satellite, et les coordonnées absolues équatoriales ont pour référence les étoiles du champ.

Chaque observation se présente sous forme de coordonnées (X_o, Y_o) dans un système de coordonnées qui lui est propre. On transforme les positions rectangulaires (x, y, z) dans le système jovien, que nous donne le modèle dynamique, dans le système de coordonnées lié à l'observation (X_c, Y_c) . La différence obtenue nous donne directement la valeur $(\Delta X, \Delta Y)$ représentant le résidu.

Pour comparer les observations, nous utiliserons les positions calculées de chaque satellite relativement à la planète en coordonnées différentielles (X, Y) et transformées dans le repère de l'observation. A partir des positions rectangulaires dans le système jovien que nous donne le modèle dynamique, on effectue les changements de repère nécessaires à la transformation de ces positions dans le repère lié à l'observateur. Au final, le calcul des positions par l'intégration numérique nous permet de tracer les résidus ou "observés moins calculés" qui fournissent l'écart entre ce qui a été mesuré et la théorie. Lors de l'ajustement, les observations ne sont pas pondérées. C'est à dire que chaque point d'observation a la même influence que les autres, sur le calcul par moindres carrés de la solution dynamique. Je nommerai NJO2004A la représentation du mouvement des satellites Amalthée et Thébé par l'intégration numérique qui nous permettra de calculer les résidus issus des observations.

Je présente en annexe, les graphes ainsi qu'un bilan statistique, des résidus pour les différents ensembles d'observations. Les résultats des résidus pour chaque point d'observation pourront être consultés en ligne sur le site web de l'IMCCE (<http://www.imcce.fr>). J'ai normalisé les résultats en représentant les résidus en X dans la couleur bleu, et les Y en rouge. Les résultats sont composés de cinq graphiques (Fig. 4.4), deux pour les repré-

sentations suivant les axes X (A) et Y (E) en fonction de la date d'observation, les deux autres sont des histogrammes en X (B) et en Y (D) et le dernier est simplement le tracé des résidus en Y en fonction de X (C) et représente de façon visuelle la "valeur" des ces observations. Les résidus de bonne qualité sont évidemment ceux qui se rapprochent le plus de la valeur nulle.

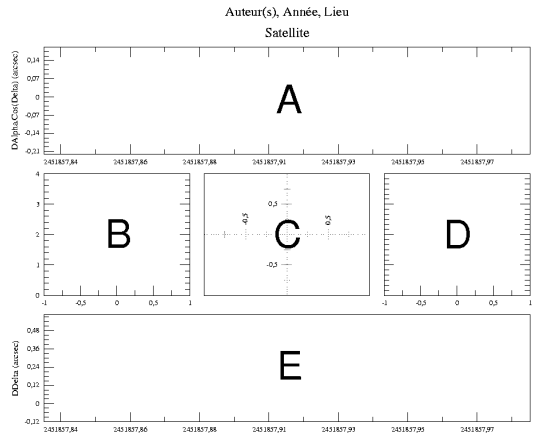


FIG. 4.4: Modèle de présentation des résidus.

4.4.1 Résidus pour les observations du Pic du Midi

Comme on peut le voir sur la figure 4.5 l'ajustement a été effectué sur l'ensemble des observations y compris sur la nuit de décembre 2001. On peut voir que l'ensemble est homogène malgré une dispersion légèrement plus grande en fin de nuit. Ceci est sûrement dû au fait que le satellite Thébé se rapproche de la planète. La pente du gradient de lumière devient plus forte et le signal du satellite plus faible. Mais dans l'ensemble, le signal sur bruit reste faible, et il serait difficile d'obtenir de meilleurs résultats sachant que les mesures faites 10 ans plus tôt nous donnent des résidus supérieurs à la seconde de degré.

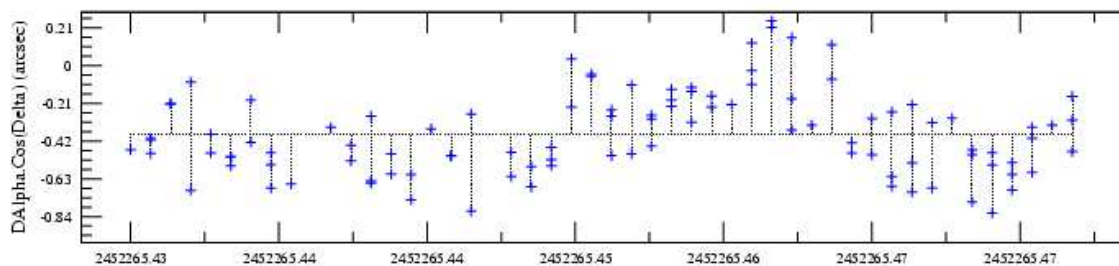


FIG. 4.5: Résidus en X des observations de Thébé réalisées avec François Colas au Pic du Midi en 2001. L'axe des abscisses définit le temps en jours juliens. Les observations ont été effectués sur une seule nuit.

Sur cet ensemble de données composé de 741 observations du satellite Thébé entre 1989 et 1991, j'en ai extraits 221 pour lesquelles les résidus étaient inférieurs à $0.8''$. Si je considérais l'ensemble complet, l'ajustement divergeait ou convergeait vers une solution improbable. On peut voir la dispersion de ces 741 observations sur la figure 4.6 et réparties de façon aléatoire.

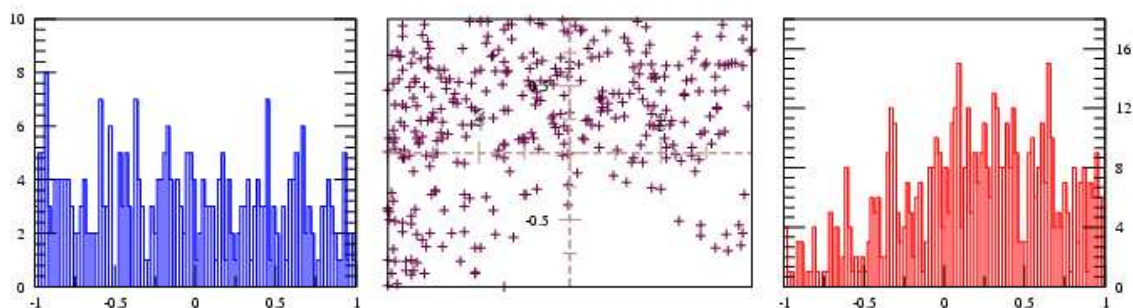


FIG. 4.6: Graphique montrant les résidus en (X,Y) des observations de Thébé réalisées par François Colas au Pic du Midi entre 1989 et 1991. A gauche l'histogramme sur les résidus en X , à droite l'histogramme pour les résidus en Y , et au milieu le tracé en X et Y .

4.4.2 Résidus pour les observations brésiliennes

Le deuxième ensemble le plus fourni en observations de Thébé et d'Amalthée est celui des observations brésiliennes. On peut voir sur les histogrammes des figures 4.7 que les résidus prennent une direction privilégiée aux alentours de 0. Toutefois pour le satellite Thébé les résidus en X sont plus ou moins dispersés. La comparaison des deux satellites est flagrante. Les deux satellites apparaissent sur la plupart des clichés. Donc la réduction de l'image est identique pour les deux satellites. Si on obtient un meilleur piqué pour Amalthée c'est bien que le rapport signal sur bruit du satellite est meilleur que celui de Thébé, même si Amalthée est plus proche de la planète.

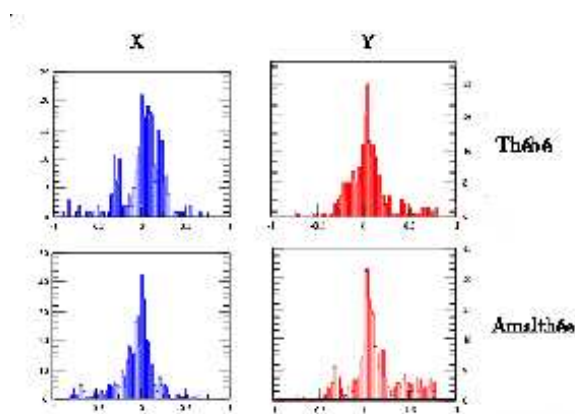


FIG. 4.7: Les observations de Thébé et Amalthée ont été réalisées au Brésil entre 1996 et 2001 par C.H. Veiga et al. Les histogrammes suivant montrent la répartition des résidus pour Thébé (en haut) et Amalthée (en bas) suivant l'axe X (à gauche) et l'axe Y à droite.

4.4.3 Résidus pour les observations à Pik Terskol

J'ai réuni dans un même ensemble les observations réalisées à l'observatoire de Pik Terskol en Ukraine entre 1998 et 2001. Les observations ont été publiées pour certaines par Kulyk, Jockers, Karpov, et Sergeev [1]. Les autres ont été réalisés par Ledovskaya et

certainement en collaboration de l'équipe ci-dessus, elles sont disponibles sur le catalogue en ligne VizieR et sur la base NSDC de l'IMCCE. Ces observations (Fig. 4.8) présentent d'excellents résultats autant pour Amalthée que pour Thébé puisque après ajustement j'obtiens des résidus moyens de 36 mas en X et 27 mas en Y avec une déviation standard de l'ordre de 130 mas. On peut comparer les différentes valeurs de chaque ensemble d'observation dans les tables A.1 et A.2 pour Thébé et les tables A.3 et A.4 pour Amalthée, situées en annexe.

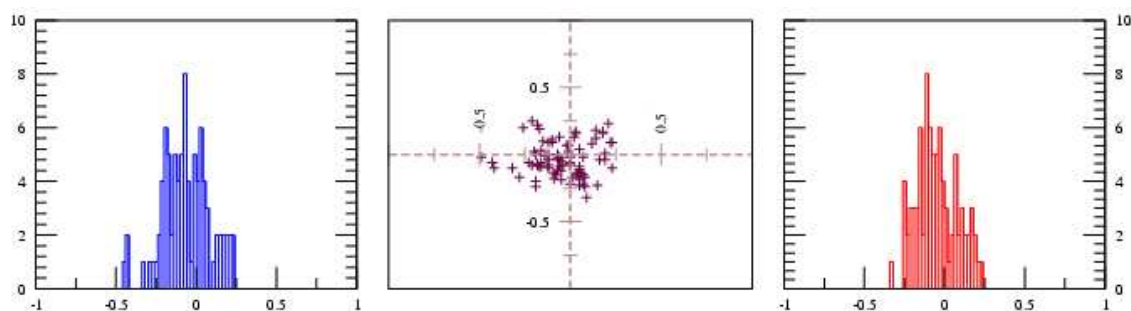


FIG. 4.8: Les figures présentent l'ensemble des observations de Thébé réalisées par Kulyk et al entre 1998 et 2000. A gauche l'histogramme sur les résidus en X, à droite l'histogramme pour les résidus en Y, et au milieu le tracé en X et Y.

4.4.4 Les observations de Pascu

Des observations en 1985, 1996 et 1997 réalisées par Dan Pascu à l'observatoire de Flagstaff, ont été ajustées. Au nombre de 15, les observations de Thébé de 1996 et 1997 sont bien ajustées mais celles de 1985 ont un fort décalage de 1". Cet ensemble (composé de 7 points) d'observations pour ce satellite est le plus ancien que je possède et les observations qui suivent temporellement, sont celles de F.Colas en 1990. Les observations d'Amalthée pour la même période s'ajustent correctement et n'ont pas ce décalage en X. De plus pour Amalthée, d'autres observations antérieures ont été prises en compte pour l'ajustement.

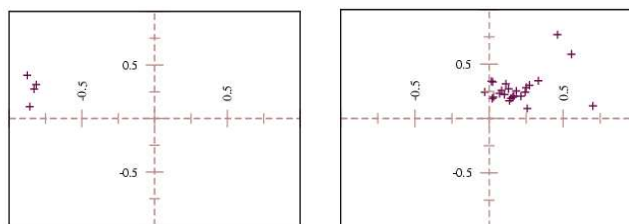


FIG. 4.9: Les observations de Thébé (à gauche) et d'Amalthée (à droite) par D.Pascu en 1985.

4.4.5 Résidus pour les observations de Flagstaff en 2000 et 2001

En collaboration avec Dan Pascu et Jim Rhode de l'équipe de l'USNO à Washington, nous sommes allés observer sur le télescope de 61 inches à Flagstaff en Arizona, lors de deux missions en 2000 et 2001. Lors de la première mission en 2000, nous avons utilisé pour

la première fois la caméra infrarouge ASTROCAM avec l'aide de Fred Vrba de l'USNO de Flagstaff. Le ciel était plus propice en 2000 qu'en 2001 puisque lors de la deuxième mission, il avait neigé et la Lune était proche de Jupiter. Nous avons recueilli 10 points en 2000 et 7 en 2001. Les résultats après ajustement ne sont pas aussi exceptionnels que ce que j'attendais en regardant la qualité des images.

Les résidus présentent de fortes dispersion en X (pour Thébé) et un biais observationnel en Y (Thébé et Amalthée). Les observations d'Amalthée pour cette période présentent un décalage important en Y (363 mas) mais sont assez bien regroupées avec une déviation standard de 100 mas. Donc, que ce soit pour Amalthée ou pour Thébé les observations présentent un résidu moyen quasi équivalent en Y.

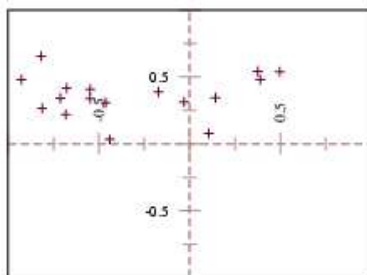


FIG. 4.10: Les observations de Thébé réalisées à Flagstaff en 2000 et 2001.

Soit c'est une erreur dans le modèle (ajustement, bilan des forces appliquées au satellite, traitement numérique,...) soit une erreur observationnelle (mesure du photocentre, système optique, caméra électronique,...).

Les résidus calculés à partir de la solution du JPL ont la même forme (diffusion des résidus en X et décalage en Y pour Thébé, décalage en Y pour Amalthée). La solution du JPL n'a pas été ajustée sur ces observations contrairement à mon modèle. S'il s'agit d'une erreur de modèle, elle est commune aux deux solutions du mouvement des satellites.

J'ai réajusté la solution de Thébé en considérant non plus des positions absolues équatoriales mais des positions différentielles par rapport à Amalthée et là encore j'ai obtenu un décalage en Y équivalent. Il est donc peu probable que ce décalage soit dû à une erreur zonale sur la position des étoiles du catalogue USNO-A2.

La réduction astrométrique des images montre que le facteur d'échelle est identique à celui mesuré lors d'étalonnages précédents de la caméra. Les résidus d'Amalthée n'ont pas cette diffusion en X contrairement à Thébé car le satellite est plus brillant, donc son profil stellaire est mieux ajusté. Par contre les résidus d'Amalthée ont ce même décalage en Y.

Le problème qui surgit dans l'analyse des résidus du satellite Thébé, est que malgré le décalage, les valeurs en Y sont peu diffuses. Ce qui suggère que dans cette direction les positions du satellite sont bien mesurées. Pourquoi ce décalage en Y et cette diffusion en X ? Si nous comparons la solution NJO2004A avec la solution du JPL, les représentations des résidus présentent une déviation standard importante en X et un résidu moyen équivalent en Y. S'il s'agit d'une erreur de modèle, elle est commune aux deux représentations du mouvement des satellites.

Le modèle que j'ai utilisé est ajusté sur l'ensemble des observations disponibles. L'ajustement du modèle s'appuie sur une minimisation globale des O-C de l'ensemble des observations. Lors de l'ajustement les ensembles d'observations ne sont pas pondérés. Un petit ensemble d'observations comme celui de Flagstaff en 2000, contraint trop peu la correction des conditions initiales. Il est probable que les erreurs des autres observations apparaissent

indirectement dans les résidus. On peut supposer que lors de l'ajustement, ces observations ont été trop peu nombreuses pour avoir influencé de façon conséquente, les corrections des conditions initiales.

4.4.6 Conclusion

Seules les observations brésiliennes (C.H. Veiga de 1995 à 2001), Les observations ukrainiennes (Kulyk-Ledovskaya de 1999 à 2000), et les observations américaines (Pascu 1985) portent sur les satellites Amalthée et Thébé. Les deux premières ont des résultats identiques et sont de bonne qualité.

Les trois derniers ensembles d'observations pour Amalthée sont de :

- Nicholson au Palomar en 1991. Elles sont d'assez bonne qualité.
- Ianna en 1979. Il y a seulement deux points à 250 mas et 700 mas de la solution.
- Sudbury en 1969. Cet ensemble d'observations photographiques est diffus avec une déviation standard de 350 mas mais il a l'avantage de comporter 73 points d'observations.

J'ai effectué une comparaison sur les résidus obtenus à partir de l'intégration numérique NJO2004A et à partir de la solution de Jacobson du Jet Propulsion Laboratory. L'ensemble des observations présente des résidus similaires. Les observations de D.Pascu en 1985 sont toutefois mieux représentées par la solution du JPL⁴.

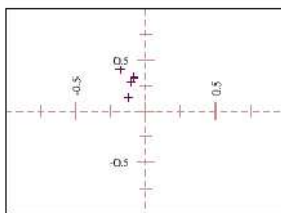


FIG. 4.11: Les observations de Thébé par D.Pascu en 1985. Les résidus sont calculés à partir des éphémérides du JPL

En conclusion, il se peut que le modèle comporte des lacunes mais la qualité des observations ne permet pas de déterminer la nature de l'erreur.

La forme des résidus calculés à partir de la solution du JPL et du modèle numérique NJO2004A, est sensiblement identique. Cela nous permet de déduire une nature observationnelle de ces erreurs.

4.5 Construction d'une éphéméride

Je propose deux représentations numériques des positions des satellites Thébé et Amalthée sur une période de 25 ans (de 1978 à 2010). La première est un calcul par l'intégration numérique. La deuxième représentation est construite à partir de coefficients de Tchebychev, elle est un peu moins précise mais gagnera en temps de calcul. Cela permettra de gérer un grand nombre de dates en peu de temps, l'utilité principale sera la prédiction de position pour l'observation de ces satellites ou la détection de phénomènes. Les phénomènes d'occultation demandent un grand nombre de calculs itératifs. Après que les rapprochements aient été déterminés, un calcul plus précis par intégration numérique permet d'affiner

⁴www.jpl.nasa.gov

la position. La représentation par intégration numérique se base sur le modèle dynamique qui a permis de réaliser l'ajustement des orbites. Les conditions initiales ont été calculées à l'avance par l'ajustement pour un ensemble de dates représentant la validité de la solution, c'est à dire de 1978 à 2010 avec un pas de deux jours. Ceci réduit le temps de calcul en utilisant ce fichier de conditions initiales.

Le 4 avril 2003 au Pic du Midi, nous avons tenté d'observer l'occultation de l'étoile Tycho 1396-00214 par les anneaux de Jupiter lorsque la planète était proche d'un point stationnaire⁵. L'éphéméride nous permettait de prédire la configuration des satellites au moment de l'observation.

William Thuillot, Jean-Eudes Arlot et moi-même avons publié une lettre dans *Astronomy & Astrophysics* sur des phénomènes d'éclipses entre Amalthée et les galiléens pour la campagne PHEMU03 [27]. Ce type d'observation est très délicat puisqu'il demande une vitesse importante d'acquisition des images et nous n'avions eu aucun écho d'observateurs éventuels.

Pour construire l'éphéméride des satellites, je procède en trois étapes. A partir des conditions initiales ajustées je crée un tableau de conditions initiales sur 25 ans avec un pas de 2 jours. Ce tableau va me servir comme première solution par intégration numérique du mouvement de Thébé. Le tableau est stocké comme étant un fichier binaire. Cela permet une lecture plus rapide des données, et la taille du fichier sur le disque sera minimale. A partir du modèle dynamique qui m'a servi à produire les conditions initiales du tableau, on peut interpoler à toute date avec un temps de calcul respectable. La deuxième étape sera de déterminer les coefficients de Tchebychev à partir de la représentation par intégration numérique NJO2004A. La période de 25 ans est fractionnée en partie de 2 jours. Pour chaque partie on calcule les coefficients qui sont sauvés dans un fichier. La dernière étape est la solution par coefficient de Tchebychev. Ici encore, on utilise un fichier binaire et pour une date donnée on extrait les coefficients pour la période correspondante.

L'ensemble de la solution par coefficients de Tchebychev est disponible sur le serveur d'éphémérides de l'IMCCE (<http://www.imcce.fr>).

4.6 Comportement des éléments osculateurs des orbites des satellites, perturbés par le J2

Le satellite sera d'autant plus sensible à la forme de Jupiter qu'il en sera proche. La planète est fortement aplatie aux pôles. Le terme de droite de l'équation 3.7 correspondant aux coefficients zonaux de la planète, sera donc important.

L'accélération du satellite, due à la gravitation s'écrit (en simplifiant l'équation 3.7) :

$$\frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = -(\mu_0 + \mu_i) \frac{\mathbf{r}_i}{r_i^3} - \mu_0 \nabla (\mathbf{J}_2 \frac{\mathbf{a}_e^2}{r_i^3} \mathbf{P}_2(\sin \theta_i)) \quad (4.2)$$

En général l'accélération réelle subie par le corps reste toujours assez voisine de l'accélération principale képlérienne en $\frac{\mu}{r^2}$. Cependant l'accélération réelle n'étant plus exactement centrale, la loi des aires est seulement approchée et l'orbite du satellite n'est plus confinée dans un plan. En supposant le terme képlérien $A_0 = \frac{\mu}{r^2}$ et A1 celui en J2, le rapport $\|\frac{A_1}{A_0}\|$ est l'ordre de grandeur de la perturbation qui est engendrée par la non-sphéricité de la planète. On trouve,

⁵La configuration géométrique du Soleil, la Terre et Jupiter fait que la position de Jupiter vue de la Terre aura tendance à s'immobiliser.

$$\left\| \frac{A_1}{A_0} \right\| \leq 3J_2 \frac{a_e}{r^2} \quad (4.3)$$

On peut redéfinir les conditions du mouvement à l'instant t_0 , soit $x_0, y_0, z_0, \dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{z}_0$, en introduisant un jeu de six autres constantes⁶ que sont a (demi-grand axe), e (excentricité), i (inclinaison), Ω (longitude du noeud ascendant), ω (argument du périjove), τ (temps de passage au périjove).

Dans l'intégration numérique, les orbites des satellites sont caractérisées par leurs coordonnées rectangulaires en position et vitesse, dans le repère, dont le plan de référence est l'équateur céleste. Les éléments osculateurs sont calculés à partir des coordonnées rectangulaires issues des équations 3.1.

Ces éléments osculateurs qui définissent l'orbite, différent du problème képlérien et varient en fonction du J_2 et du temps. La perturbation qui est le dernier membre de l'équation 4.2 dérive d'un potentiel. On peut caractériser la perturbation agissant sur chaque variable, par sa dérivée en fonction du temps. Par exemple pour la longitude du noeud ascendant on écrit la dérivée en fonction du temps selon la formule 4.4. On peut remarquer que la perturbation du J_2 agit sur le problème képlérien par un mouvement du noeud dans le sens indirect (Fig. 4.12).

$$\frac{d\Omega}{dt} = -n \frac{3J_2}{2\sqrt{1-e^2}} \left(\frac{a_e}{a}\right)^2 \left(\frac{a}{r}\right)^3 \cos i (1 - \cos(2w + 2\omega)) \quad (4.4)$$

Les valeurs moyennes de la la variation de la longitude du périjove, du moyen mouvement et de l'argument du périjove sont données par les formules 4.5.

$$\begin{aligned} n_m &= \left(\frac{GM}{a^3}\right) \left[1 + \frac{3}{4} \left(\frac{a_e}{a}\right)^2 J_2\right] \\ \frac{d\Omega_m}{dt} &= \left(\frac{GM}{a^3}\right) \left[-\frac{3}{2} \left(\frac{a_e}{a}\right)^2 J_2\right] \\ \frac{d\omega_m}{dt} &= \left(\frac{GM}{a^3}\right) \left[3 \left(\frac{a_e}{a}\right)^2 J_2\right] \end{aligned} \quad (4.5)$$

De même, on peut regarder le comportement de l'argument du péricentre qui lui, augmente au cours du temps. En notant M la valeur de l'anomalie moyenne⁷, on introduit la longitude moyenne L comme étant la somme d'angles qui ne sont pas tous situés dans le même plan.

$$L = \Omega + \omega + M \quad (4.6)$$

La longitude moyenne de Thébé augmente continuellement, ainsi que l'anomalie moyenne (voir Fig. 4.12). Nous avons un problème des deux corps perturbés et les éléments osculateurs réels fluctuent autour des valeurs képlériennes. Je présente dans la Table 4.4 la valeur moyenne de ces éléments ainsi que leur écart type et la pente issue d'une régression linéaire.

Maintenant, nous allons étudier le comportement des éléments osculateurs d'Amalthée, Adrastée et Métis. On peut voir sur la figure 4.12 que le mouvement du noeud ascendant d'Amalthée diminue au cours du temps en accord avec l'équation 4.4. Les figures 4.13 font référence aux satellites Adrastée et Métis. Par contre l'anomalie moyenne a tendance à être en libration autour de 0 mais le moyen mouvement lui, varie peu autour de la valeur moyenne de 717.65. L'argument du périastre d'Amalthée augmente rapidement ce qui a pour conséquence dans la formule 4.6 que les pentes des courbes pour la longitude moyenne, la longitude du noeud et l'argument du péricentre se compensent.

⁶Ou, par combinaison de ces constantes.

⁷ M est la mesure de l'arc compté à partir du périastre d'un point matériel fictif se déplaçant sur le cercle apsidal d'un mouvement circulaire uniforme de même période P que le mouvement réel. $M = n(t - \tau)$

Eléments Osc.	Moyenne	Ecart type	Pente
Demi grand axe (km)	222400.9	12.75	0.063
Excentricité	0.0177	1.6E-3	7.8E-6
Inclinaison (deg)	1.0741	8.7E-4	3.7E-6
Moyen mouvement (deg/j)	531.247	0.0307	2.3E-4
Longitude du noeud (deg)	-	0.047	-1.221
Argument du périastre (deg)	-	5.295	2.372
Longitude moyenne (deg)	-	0.006	533.69
Anomalie moyenne (deg)	-	5.282	532.54

TAB. 4.3: Variation des éléments osculateurs de Thébé. Les quatre premiers ont une pente faible, on exprime donc la moyenne. Les quatre autres ont une pente non négligeable et l'écart type est issue de la régression linéaire.

Eléments Osc.	Moyenne	Ecart type	Pente
Demi grand axe (km)	181994.8	1.903	7.8E-4
Excentricité	3.77E-3	1.46E-3	7.242E-7
Inclinaison (deg)	0.3659	4.42E-5	1.3494E-7
Moyen mouvement (deg/j)	717.65	0.011	4.64E-6
Longitude du noeud (deg)	-	0.069	-2.4693
Argument du périastre (deg)	-	26.617	724.653
Longitude moyenne (deg)	-	1.045e-3	722.601
Anomalie moyenne (deg)	-	26.664	0.4171

TAB. 4.4: Variation des éléments osculateurs d'Amalthée. Les quatre premiers ont une pente faible, on exprime donc la moyenne. Les quatre autres ont une pente non négligeable et l'écart type est issue de la régression linéaire.

Dans le cas de Thébé, l'anomalie moyenne "circule" au cours du temps de manière croissante. Au contraire, pour Amalthée, Métis et Adrastée, l'anomalie moyenne M fluctue autour de la valeur nulle. Cela s'explique par le mouvement croissant du périjove. Dans le cas de ces trois satellites la variation de la longitude du périjove ($\varpi = \Omega + \omega$) est pratiquement égale à la valeur du moyen mouvement n . L'orbite se comporte de telle façon que le satellite reste toujours au plus proche de la planète.

J'ai tracé (Fig. 4.14) la variation de l'argument du périastre d'Amalthée en fonction de sa valeur pour différentes valeurs du J_2 . La zone de libration se situe pour des valeurs inférieures à 0.003. Et, la valeur réelle est caractérisée par la courbe en noir pour un $J_2 = 0.014736$. Il y a donc une zone d'influence définie par la valeur du J_2 de la planète

4.7 Conclusion

On en conclut qu'il y a parmi les satellites proches au moins deux types d'orbite dépendant de la distance à la planète et ceci est du en grande partie, à la valeur extrême du J_2 . Il se pourrait donc, qu'il y ait une résonance de la part du J_2 sur le mouvement des satellites Amalthée, Adrastée et Métis. Les valeurs moyennes des éléments définis dans les équations 4.5 correspondent aux valeurs calculées pour Thébé. Dans le cas des autres satellites, seule la valeur moyenne de la variation de l'argument du périastre ne correspond

pas à ce que nous calculons. On pourrait envisager aussi que le rapport $\|\frac{A_1}{A_0}\|$ soit si grand (tout de même proche de 0) que les équations d'un problème de Kepler perturbé telle que 4.5 ou 4.4 ne s'écrivent plus de la même façon. J'ai mis en valeur cette différence au sein des satellites internes de Jupiter mais je n'ai pas la réponse du problème à l'heure actuelle.

FIG. 4.12: Mouvement de la longitude du noeud, de l'argument du périastre, de la longitude moyenne et de l'anomalie moyenne de Thébé (à gauche) et Amalthée (à droite), soumis à la perturbation du J_2 . Le temps est décompté à partir d'une valeur initiale arbitraire.

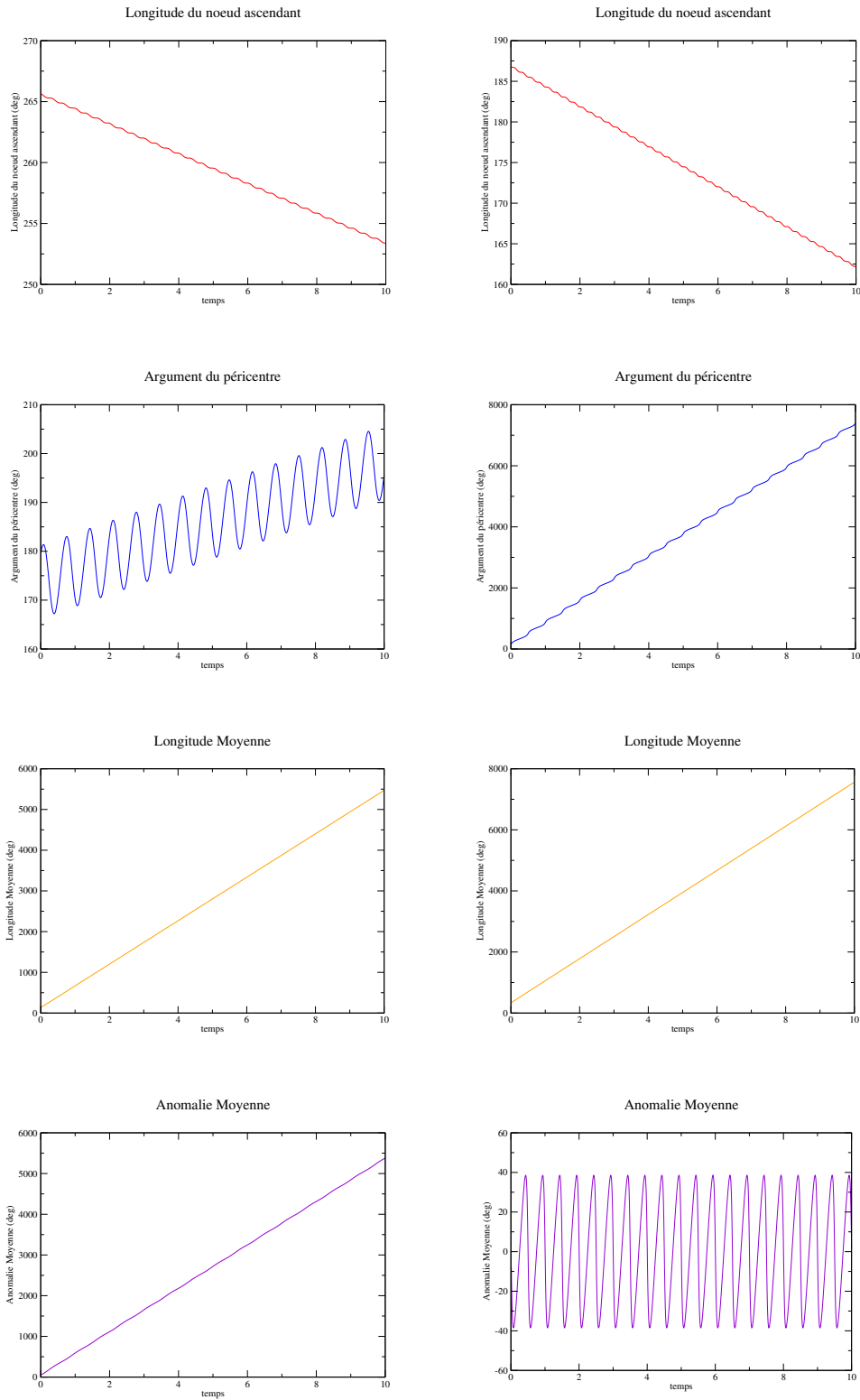


FIG. 4.13: Mouvement de la longitude du noeud, de l'argument du périastre, de la longitude moyenne et de l'anomalie moyenne d'Adrastée (à gauche) et Métis (à droite) soumis à la perturbation du J_2 . Le temps est décompté à partir d'une valeur initiale arbitraire.

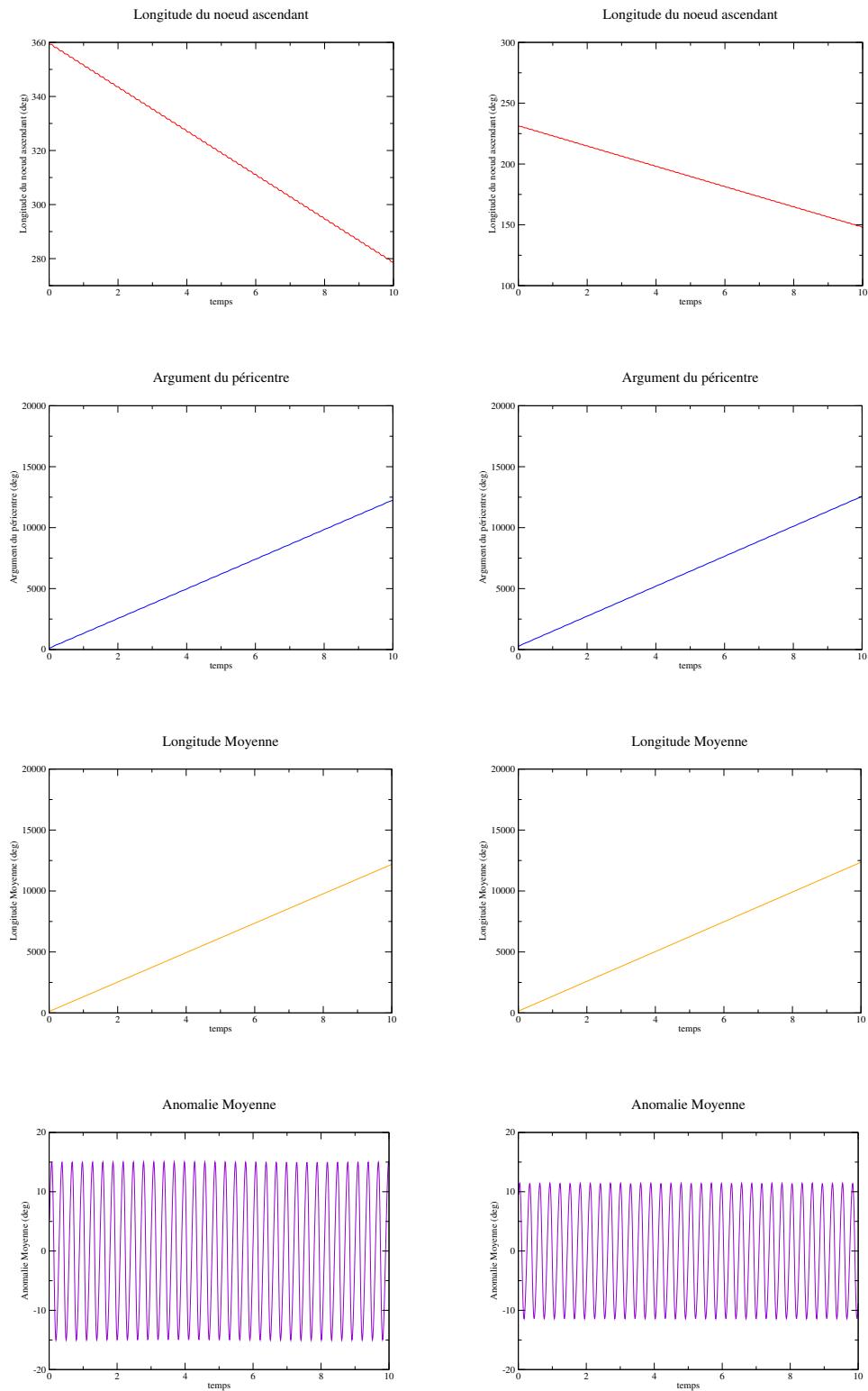
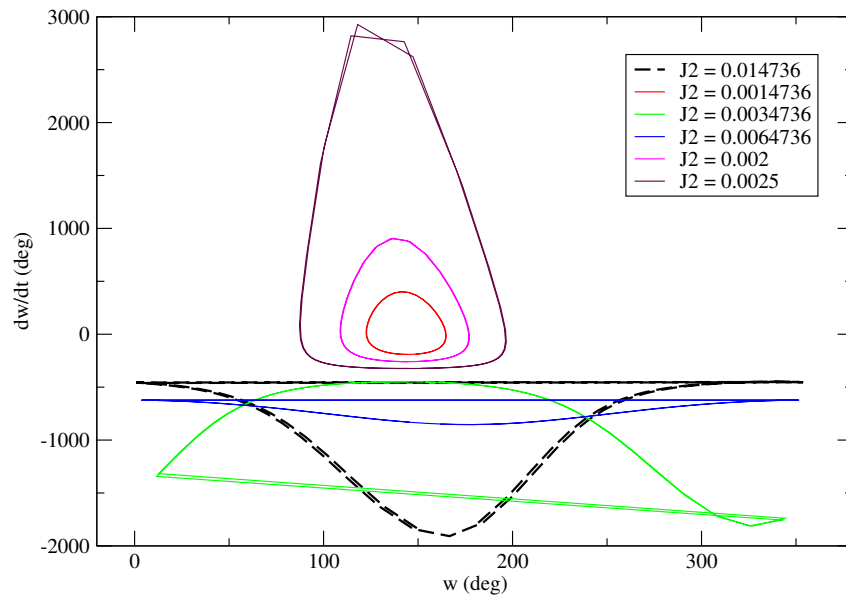


FIG. 4.14: Variation de l'argument du périastre d'Amalthee en fonction de sa valeur pour différentes valeur du J_2 . La courbe en pointillé correspond à la valeur réelle du J_2 .



Deuxième partie

Le mouvement des satellites
d'astéroïdes

Chapitre 5

Satellites d'astéroïdes



5.1 Introduction

Les méthodes d'intégration numérique et d'ajustement d'orbites, ont été traitées dans les chapitres précédents. Elles s'appliquaient aux satellites proches de Jupiter, mais d'autres objets du système solaire dans des configurations similaires, peuvent être traités par la même approche. Il est donc intéressant d'appliquer ces méthodes à d'autres problèmes dynamiques pour connaître les champs d'application de celles-ci.

Il sera donc question dans cette dernière partie, du problème que définit le mouvement d'un corps autour d'un astéroïde. Nous devons réécrire les équations du mouvement, répertorier les observations existantes et finalement trouver les conditions initiales qui représentent correctement le mouvement.

5.2 Découverte

Les astéroïdes sont des corps rocheux de petite dimension et de forme irrégulière qui sont en orbite autour du Soleil. Ils se sont formés il y a 4.5 milliards d'années en même temps que le système solaire. Le 1er Janvier 1801, Giuseppe Piazzi découvre le premier astéroïde : "Cérès". Depuis, des centaines de milliers d'astéroïdes ont été découverts et se répartissent suivant une grande variété d'orbites autour du soleil. Les astronomes les ont catalogués suivant différentes familles en fonction de leur paramètres orbitaux et de leur composition qui peut être caractérisée par la façon dont ils renvoient la lumière. La majeure partie de ces astéroïdes provient du disque protoplanétaire, ce qui permet d'obtenir une multitude d'informations sur la composition et l'évolution de notre système solaire. Jusqu'à nos jours, nous avons très peu d'informations sur la composition et la structure interne de ces petits corps. Les observations radar et photométriques fournissent des informations sur leur forme et leurs axes de rotations. Mais l'étude du mouvement de corps orbitant autour de certains astéroïdes peuvent nous donner des informations supplémentaires. Notamment la masse, et si la forme et les dimensions sont connues, la densité et la porosité. La stabilité du système nous donnera l'histoire de leur formation et de leur évolution. La sonde Galileo fut la première à observer directement un satellite d'astéroïde lors d'un rapprochement avec (243) Ida en 1993. L'objet secondaire appelé Dactyl a un diamètre de 1.6 km [28]. La première idée après avoir découvert un satellite est de s'imaginer que ces systèmes gravitationnels sont beaucoup plus répandus. C'est grâce aux potentiels du système d'optique adaptative qui permet d'obtenir des images de haute résolution angulaire et la séparation d'un objet faible à quelques centièmes de mas d'un objet très brillant, que la première observation directe depuis le sol, fut celle de Petit-Prince gravitant autour de (45) Eugenia [29] au CFHT¹. Nous avons concentré nos efforts sur un système de ce type, l'astéroïde (22) Kalliope. Au début de cette étude, nous possédions un grand nombre d'observations. Ce qui nous a permis, sur ce système binaire, d'en dégager le maximum d'informations.

5.3 (22) Kalliope

Le satellite de (22) Kalliope appelé Linus, a été découvert le 29 Août 2001 grâce au télescope Keck de 10 mètres au Mauna Kea à Hawaï par Margot et Brown [30]. D'autres observations ont été effectuées au télescope Canada-France-Hawaï quelques jours plus tard, et au télescope de 5 mètres du Mont Palomar ce qui a permis de calculer les paramètres

¹Canada-France-Hawaï Telescope

principaux de l'orbite du satellite. Les observations qui ont suivi, ont été faites à l'observatoire de Lick en Octobre 2001 et en Novembre 2001 au Keck, par Franck Marchis. Ensuite un point à été obtenu en Avril 2002 et trois observations ont été faite au Very Large Telescope en Janvier 2003 [31]. On peut voir sur le graphique 5.3 la répartition de ces observations au cours du temps.

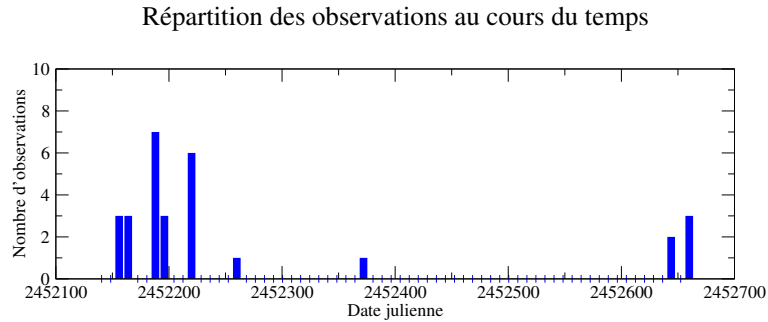


FIG. 5.1: Histogramme présentant la répartition des observations du satellite de Kalliope au cours du temps.

Sur la figure 5.3 on peut voir la position dans le système solaire de l'astéroïde et de la Terre au moment des observations. Ceci va nous permettre par la suite de comprendre l'orientation du plan de rotation de l'objet secondaire au fil des observations. A chaque date nous observons le satellite dans le plan tangent à l'observateur sur la sphère céleste. Pour remonter à la position du satellite dans le plan de l'équateur de Kalliope nous devons effectuer différents changements de repères relatifs aux dates d'observation.

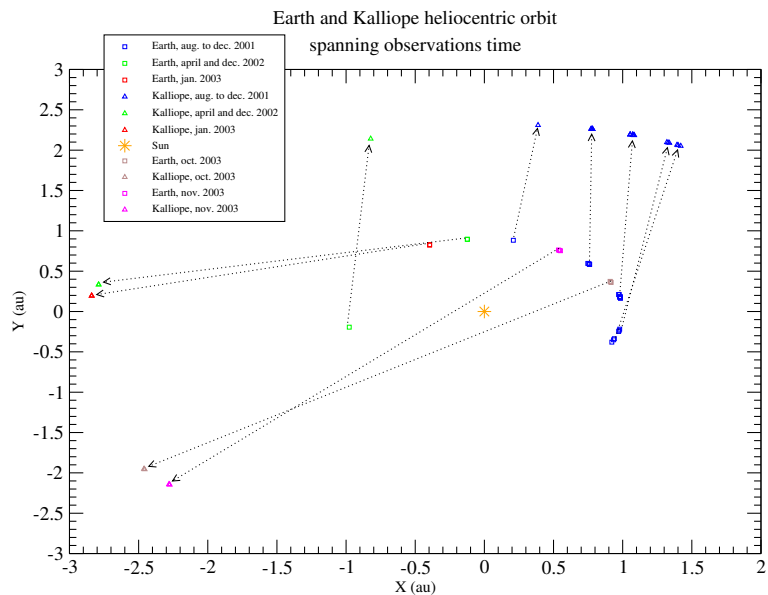


FIG. 5.2: Position de l'astéroïde Kalliope dans le système solaire aux dates des observations.

5.4 Les changements de repère

Je vais décrire dans cette section le procédé de transformation des repères. Ceci nous permettra de comprendre comment à partir d'une observation on remonte à une position "dynamique" ici en coordonnées rectangulaires dans le système gravitationnel de Kalliope. A une date donnée (choisie comme étant une date d'observation ou alors dans le cas d'une éphéméride, une date propice à une future observation) nous devons connaître la position de la Terre dans le système solaire ainsi que la position de (22) Kalliope. Pour se faire, j'ai utilisé les routines du JPL DE405 pour avoir la position de la Terre. J'utilise des routines dérivées de "Ephem_Asteroide" issue d'Eproc [20] pour la position de Kalliope. La première étape est la transformation des dates exprimées en Temps universel en Temps Terrestre qui va être notre base de temps pour les calculs des mouvements. Ensuite nous devons connaître dans le système de coordonnées rectangulaires, les vecteurs position-vitesse suivants :

Vecteurs dans le repère moyen J2000

- \mathbf{V}_{GO} vecteur géocentrique de l'observateur dans le repère moyen J2000 à la date TT.
- \mathbf{V}_{GK} vecteur géocentrique de Kalliope dans le repère moyen J2000 à la date TT.
- \mathbf{V}_{KL} vecteur Kalliope-Linus à la date TT.
- \mathbf{V}_{OK} vecteur observateur-Kalliope dans le repère moyen J2000 à la date TT.
- \mathbf{V}_{OL} vecteur observateur-Linus dans le repère moyen J2000 à la date TT.

Vecteurs relatif au barycentre du système solaire dans le repère moyen J2000

- \mathbf{V}_{BT} vecteur barycentre système solaire de la Terre dans le repère moyen J2000 à la date TDB.
- \mathbf{V}_{BK} vecteur barycentre système solaire de Kalliope dans le repère moyen J2000 à la date TDB.
- \mathbf{V}_{BL} vecteur barycentre système solaire de Linus dans le repère moyen J2000 à la date TDB.

Vecteurs topocentrique dans le repère moyen J2000 corrigé du temps de lumière

- \mathbf{V}_{OK}^{ast} vecteur observateur-Kalliope à la date TT.
- \mathbf{V}_{OL}^{ast} vecteur observateur-Linus à la date TT.

Vecteurs dans le repère moyen de la date

- \mathbf{V}_{OK}^{app} vecteur observateur-Kalliope à la date TT.
- \mathbf{V}_{OL}^{app} vecteur observateur-Linus à la date TT.

A ce stade nous avons l'expression des vecteurs dans le repère moyen² J2000. Ici le plan de référence est défini par l'équateur moyen de la Terre à J2000 et l'équinoxe à J2000. La correction du temps de lumière³ va nous permettre d'exprimer les vecteurs en coordonnées astrométriques J2000. Si on définit ce temps de lumière par τ , on procède par itération pour obtenir le vecteur en coordonnées astrométriques J2000 en retranchant les coordonnées barycentriques de l'observateur à la date t aux coordonnées géométriques barycentriques de l'astre à la date $t - \tau$. A chaque itération on recalcule la valeur de τ en notant c la vitesse de la lumière par :

$$\tau = \frac{\|\mathbf{V}_{OL}\|}{c} \quad (5.1)$$

²rapporté à un équateur et un équinoxe fixes dont on précise l'époque

³Temps que va mettre la lumière pour parvenir jusqu'à la Terre

L'expression du vecteur en coordonnées astrométriques J2000 pour chaque itération est de la forme :

$$\mathbf{V}_{ol}^{ast} = \mathbf{V}_{BL}(t - \tau) - \mathbf{V}_{BL}(t) \quad (5.2)$$

On obtient ainsi les vecteurs en coordonnées astrométriques J2000 de Kalliope et de son satellite liés à l'observateur. Successivement dans l'ordre, nous devons maintenant corriger ces vecteurs par :

Transformation d'un vecteur exprimé en coordonnées astrométriques J2000 en coordonnées apparentes de la date

- ▶Déflexion relativiste des rayons lumineux (supposé nul dans le cas de Kalliope)
- ▶Aberration annuelle
- ▶Aberration diurne (nulle si on considère des observations géocentriques)
- ▶Précession
- ▶Nutation

On obtient ainsi, les vecteurs (dans le repère moyen de la date) observateur-Kalliope \vec{V}_{ok}^{app} et observateur-Linus \mathbf{V}_{ol}^{app} en coordonnées apparentes de la date. Pour finir, il suffit de prendre le vecteur Kalliope-Linus en coordonnées apparentes de la date \mathbf{V}_{kl}^{app} à partir de :

$$\mathbf{V}_{KS}^{app} = \mathbf{V}_{OS}^{app} - \mathbf{V}_{OK}^{app} \quad (5.3)$$

et on effectue sa transformation sur la sphère céleste pour avoir les coordonnées équatoriales apparentes respectivement α^{kall} , δ^{kall} et α^{lin} , δ^{lin} . On obtient les coordonnées apparentes équatoriales différentielles par :

$$\begin{aligned} X_{linus} &= (\alpha_{kall} - \alpha_{linus}) \cdot \cos(\delta_{kall}) \\ Y_{linus} &= \delta_{kall} - \delta_{linus} \end{aligned} \quad (5.4)$$

On peut comparer ces coordonnées à l'observation ou fournir une éphéméride. On remarquera que dans ce processus, les positions de la Terre et de Kalliope sont données par les théories du mouvement de ces corps. L'étude que nous présentons dans les sections suivantes portera essentiellement sur le vecteur Kalliope-Linus. Le mouvement de ce dernier nous est à priori inconnu.

5.4.1 Modèle dynamique

Le modèle que l'on va utiliser ici est un modèle basé sur le problème des deux corps perturbés par la forme de Kalliope (supposée ellipsoïdale) définie par ses coefficients zonaux. On écrit les équations de la dynamique de la même façon que celles du problème Jovien (eq. 3.7).

$$\frac{d^2 \mathbf{r}_s}{dt^2} = -(\mu_k + \mu_s) \frac{\mathbf{r}_s}{r_s^3} + \nabla \mathbf{R}_s \quad (5.5)$$

En prenant comme notation : \mathbf{r}_s le vecteur planétocentrique du satellite, $\mu_s = k^2 m_s$ la masse réduite avec k la constante de Gauss et m_s la masse du satellite, et enfin $\nabla \mathbf{R}_s$ le gradient de la force de perturbation liée aux coefficients zonaux de Kalliope, on exprime la force de perturbation $\nabla \mathbf{R}_s$ pour ces coefficients zonaux J2 et J3 de la manière suivante :

Notation

$\frac{\partial R_{J2}}{\partial}$: dérivée partielle par rapport à x,y ou z de la force de perturbation

x_s, y_s, z_s : Position rectangulaire du satellite dans le repère lié à Kalliope.
 r_s : distance (Kalliope - Satellite) = $\sqrt{x_s^2 + y_s^2 + z_s^2}$
 ae : rayon équatorial de Kalliope
 J_2 : coefficient zonal de 2^{me} ordre.
 J_3 : coefficient zonal de 3^{me} ordre.
 α_{pn}, δ_{pn} : coordonnées équatoriales du pôle Nord de Kalliope.
 θ_s : latitude du satellite par rapport à l'équateur de Kalliope.

Expression de la force de perturbation par le coefficient zonal J2

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial R_{J_2}}{\partial x} &= \frac{-\mu_k a e^2 J_2}{16 r_s^9} (-120 x_s r_s^4 \sin^2 \theta_s + 24 x_s r_s^4 + 48 \sin \theta_s \cos \delta_{pn} \cos \alpha_{pn} r_s^5) \\
 \frac{\partial R_{J_2}}{\partial y} &= \frac{-\mu_k a e^2 J_2}{16 r_s^9} (-120 y_s r_s^4 \sin^2 \theta_s + 24 y_s r_s^4 + 48 \sin \theta_s \cos \delta_{pn} \sin \alpha_{pn} r_s^5) \\
 \frac{\partial R_{J_2}}{\partial z} &= \frac{-\mu_k a e^2 J_2}{16 r_s^9} (-120 z_s r_s^4 \sin^2 \theta_s + 24 z_s r_s^4 + 48 \sin \theta_s \sin \delta_{pn} r_s^5)
 \end{aligned} \tag{5.6}$$

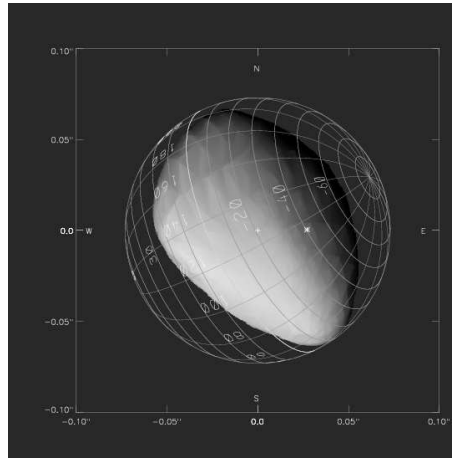
Expression de la force de perturbation par le coefficient zonal J3

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial R_{J_3}}{\partial x} &= \frac{\mu_k a e^3 J_3}{r_s^6} (17.5 x_s \sin^2 \theta_s - 7.5 x_s \sin \theta_s - 7.5 \sin^2 \theta_s \cos \delta_{pn} \cos \alpha_{pn} r_s + 1.5 \cos \delta_{pn} \cos \alpha_{pn} r_s) \\
 \frac{\partial R_{J_3}}{\partial y} &= \frac{\mu_k a e^3 J_3}{r_s^6} (17.5 y_s \sin^2 \theta_s - 7.5 y_s \sin \theta_s - 7.5 \sin^2 \theta_s \cos \delta_{pn} \sin \alpha_{pn} r_s + 1.5 \cos \delta_{pn} \sin \alpha_{pn} r_s) \\
 \frac{\partial R_{J_3}}{\partial z} &= \frac{\mu_k a e^3 J_3}{r_s^6} (17.5 z_s \sin^2 \theta_s - 7.5 z_s \sin \theta_s - 7.5 \sin^2 \theta_s \sin \delta_{pn} r_s + 1.5 \sin \delta_{pn} r_s)
 \end{aligned} \tag{5.7}$$

On remarquera une fois de plus que l'on utilise la latitude θ_s du satellite sur l'équateur de Kalliope ce qui simplifie les équations ci-dessus. θ_s est issu des positions rectangulaires du satellite et des coordonnées du pôle Nord de Kalliope suivant l'équation 3.3. On utilise la valeur de α_{pn} et de δ_{pn} fournies par Kaasalainen⁴ en coordonnées écliptiques J2000 $\lambda_{pn} = 20.3$ deg et de $\beta_{pn} = -22.9$ deg. Le rayon équatorial ($ae \sim 90$ km) de (22) Kalliope est fourni par les résultats de la mission spatiale IRAS (Tedesco and al, 2002). Ces valeurs sont issues de l'étude photométrique de (22) Kalliope et nous pouvons voir sur la figure 5.3 la forme obtenue de l'astéroïde par inversion des courbes de lumières par Kasalainen et sa configuration lors des observations d'octobre 2001.

⁴Communications privées

FIG. 5.3: Configuration de (22) Kalliope le 1er Octobre 2001.



Au commencement de cette étude c'est à peu près tout ce que l'on pouvait connaître du système gravitationnel de Kalliope. Pour avancer sur la dynamique, il nous fallait connaître la masse de Kalliope, et les positions et vitesses à un instant donné pour établir des conditions initiales à partir desquelles on pourra extrapoler le mouvement de Linus à l'aide du modèle dynamique défini ci-dessus.

5.4.2 Les observations

La magnitude visible apparente de Kalliope est 11 en octobre et novembre 2001. Il était directement observable à cette période en optique adaptative puisque la magnitude limite est de 14 pour l'instrument de 3 mètres du Lick Observatory. La caméra IRCAL⁵ était montée au foyer du télescope. La taille du pixel représente 0.0765 seconde de degré. Le compagnon se situait à une distance de 0.545 seconde de degré avec une différence de magnitude de 3.22 ± 0.20 . Il a été observé dans les bandes H($1.656\mu\text{m}$), K($2.195\mu\text{m}$) et J($1.238\mu\text{m}$). Les meilleurs rapports signal sur bruit ont été obtenus en bande K. Les temps de pose sont de 60 secondes. La résolution angulaire est de $0.157 \pm 0.004''$ et la taille théorique de Kalliope est $0.15''$, donc l'objet n'est pas résolu sur ces images. La figure 5.4 présente une image faite à l'observatoire de Lick en bande Ks.

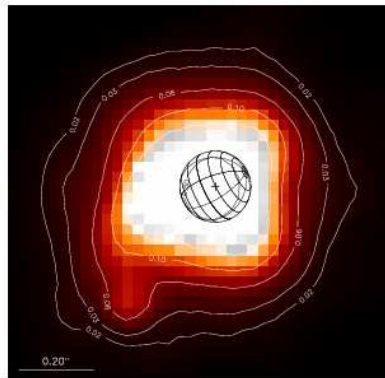
⁵constructeur UC-Berkeley. Matrice HgCdTe 256x256 pixels. Sensibilité de 1 à $2.5\mu\text{m}$.

FIG. 5.4: Observation au télescope de 3 mètres au Lick Observatory.



Le 2 et 3 novembre 2001 d'autres observations ont été effectuées à l'observatoire Lick mais aussi sur le télescope de 5 mètres du mont Palomar avec les systèmes d'optique adaptative PALAO. La caméra PHARO⁶ est une matrice HgCdTe de 1024x1024 pixels. La taille du pixel est 0.025 seconde de degré. Le temps total d'intégration pour ces images est d'environ 54.5 secondes. Kalliope est pratiquement résolu puisque les images présentent une résolution angulaire de 0".094 en bande K et sa taille angulaire théorique au moment de l'observation est de 0".17. La figure 5.5 présente une image faite au mont Palomar en bande Ks.

FIG. 5.5: Observation au télescope de 5 mètres du Mont Palomar en bande Ks.



5.4.3 L'ajustement

A partir des observations d'octobre 2001, il a été possible d'ajuster un modèle non pas dynamique mais géométrique. C'est-à-dire que dans un premier temps, il a fallu ajuster une ellipse qui ne respectait pas forcément la deuxième loi de Kepler. A partir des données

⁶Constructeur Rockwell HAWAII. Sensibilité de 1 à 2.5 μm .

corrigées, des variations de distance géométrique et des changements d'aspect apparent du système dûs aux déplacements de la Terre et de Kalliope sur leur orbite respective, une ellipse képlérienne a été ajustée. Une fois la position du plan de l'orbite dans l'espace déterminée, l'ajustement de la seconde loi de Kepler permet la détermination du moyen mouvement.

Successivement, nous avons pu contraindre la masse et trouver des conditions initiales à partir desquelles le problème s'ajuste sur les observations d'octobre et de novembre 2001. La masse de l'objet secondaire a été déduite de l'étude photométrique des observations. Le rapport de flux nous donne le rapport de surface, et nous en déduisons le rayon de l'objet secondaire. En supposant une densité identique avec l'objet primaire, on en déduit finalement le rapport de masse. Ainsi, on obtient une masse de 1.08 % celle de Kalliope.

Après ajustement de l'orbite sur les observations d'octobre et novembre 2001, nous étions en mesure d'avoir des conditions initiales en position et vitesse du satellite. Les résidus sur l'ensemble des observations présentent des valeurs trop importantes. Par contre pour les différentes périodes d'observations, nous nous apercevons que tous les points se situent sur le tracé de l'orbite. Cela nous laisse à penser que la masse est mal déterminée. Ce paramètre agit selon la troisième loi de Kepler sur la période. Ce qui devrait corriger ces écarts en longitude sur l'orbite du satellite. Mais le système gravitationnel étant très sensible à un changement de masse, il m'a été impossible d'ajuster la masse en complément des positions et vitesses. En effet lors de l'ajustement la correction apportée à chaque itération ne doit pas dépasser 20 kilomètres sinon l'ajustement perd totalement sa stabilité et on perd du même coup la convergence vers une solution dynamiquement "correcte". Les résidus peuvent effectivement baisser après un ajustement mais la solution montre que le satellite est envoyé à des milliers de kilomètres. Pour "forcer" la solution à rester autour d'une valeur supposée proche des conditions initiales j'ai utilisé des valeurs calculées en complément des observations. Les résidus étant nuls à la première itération du calcul cela force la solution à ne pas s'éloigner des valeurs de départ tout en modifiant suffisamment les conditions initiales.

5.4.4 Les résultats

Nous avons pu remarquer que l'objet secondaire tournait sensiblement plus vite qu'un problème des deux corps classique. Donc la valeur du J_2 ne peut pas être nulle (0.2). Le J_3 a une participation très faible et on le considère nul. On résume les paramètres de l'orbite obtenus dans la table 5.1.

L'ajustement sur la totalité des observations n'a pas convergé pour les paramètres d'orbites énoncés dans la table 5.1. Mais comme on peut le remarquer sur les figures 5.6 la totalité des observations se retrouvent sur le tracé de l'orbite du satellite. C'est pourquoi, je pense, que le problème provient des masses des corps qui agissent mutuellement sur la période du satellite. Cette étude s'arrête à ce stade où j'ai fournis à F. Marchis la forme des orbites en vue de prochaines observations. Nous prévoyons lors des observations futures d'obtenir des points suffisamment bien répartis pour contraindre au maximum les masses.

5.5 Nephthys, Hermione et les autres...

Avec les progrès qu'apporte l'optique adaptative sur les observations nous sommes en mesure d'obtenir des observations directes de nouveaux systèmes binaires. Nous sommes

TAB. 5.1: Valeurs des principaux paramètres qui définissent l'orbite du satellite de (22) Kalliope.

Masse du primaire	=	0.31701541007E-11	Masse solaire
Masse du secondaire	=	0.34237664287E-13	Masse solaire
J2	=	0.2	
J3	=	0.0	
Demi-grand axe	=	1116	km
Inclinaison	=	23	deg
Excentricité	=	0.02	
Temps de passage au péricentre	=	2452186.026827	jours julien
Moyen mouvement	=	100	deg j^{-1}
Période	=	3.59	jours
Coord.pôle λ_0	=	20.3	deg
Coord.pôle β_0	=	-22.9	deg

en train de travailler sur les systèmes d'Hermione et de Nephthys dont nous avons respectivement 6 et 10 observations suffisamment bien réparties. Les résultats apportés par l'étude de (22) Kalliope ne sont à mon avis qu'une étape intermédiaire pour envisager l'avenir dynamique des systèmes doubles d'astéroïdes. J'ai débuté ce travail en utilisant les programmes issus du système jovien et adaptés aux systèmes d'astéroïdes doubles. J'ai pu apprécier la valeur d'une telle étude mais aussi ses limites. Ceci me permet donc, pour la suite, d'envisager le problème différemment afin d'obtenir les paramètres de la dynamique directement à partir des observations et non plus par une succession d'ajustement des conditions initiales.

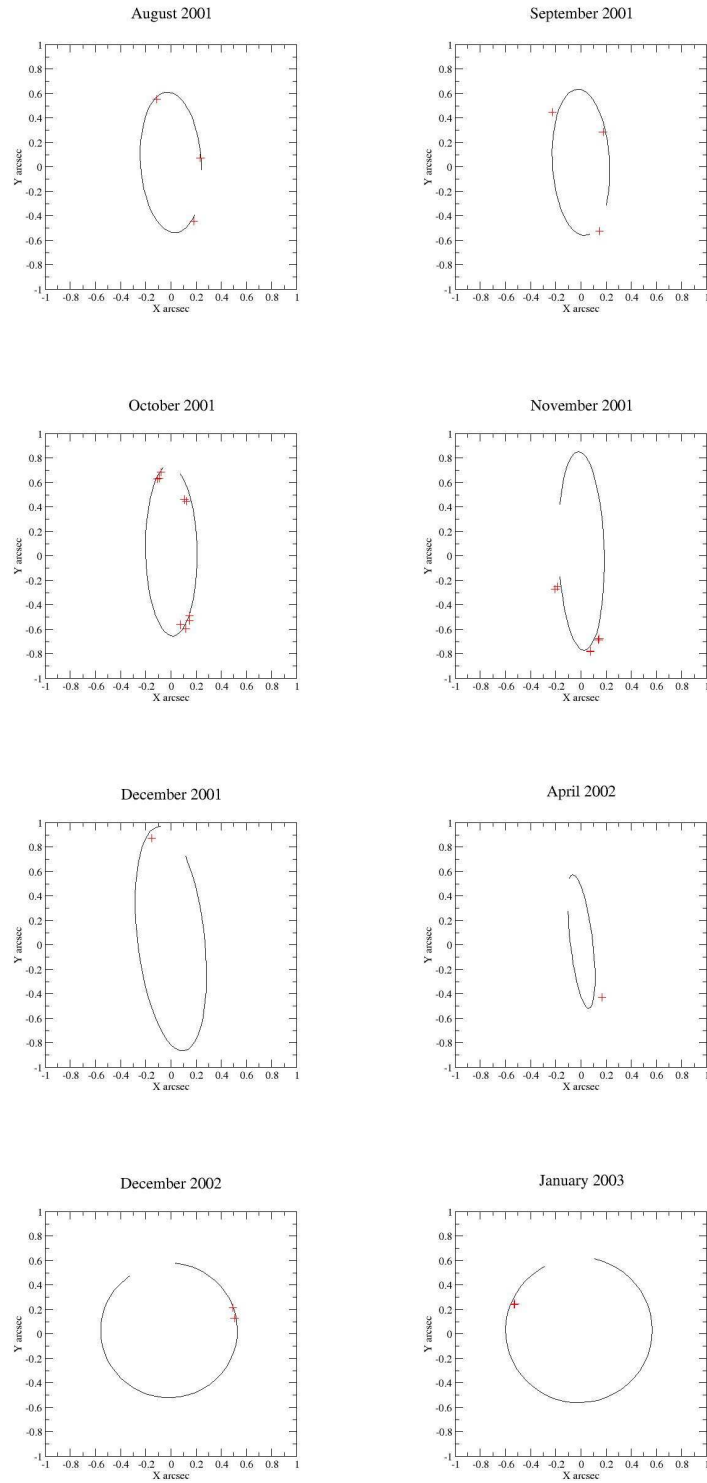
TAB. 5.2: Résidus obtenus lors de l'ajustement sur les observations.

Date julienne Temps Universel	Date Grégorienne Temps Universel	X obs. "	Y obs. "	Résidu X "	Résidu Y "
2452150.615000000	2001/08/29 02 :45 :36.000	0.1837	-0.5367	0.1325	0.0932
2452152.606000000	2001/08/31 02 :32 :38.400	-0.1109	0.6065	-0.0541	-0.0515
2452186.049322917	2001/10/03 13 :11 :01.500	0.1065	0.3972	-0.0481	0.0641
2452186.058240741	2001/10/03 13 :23 :52.000	0.1233	0.3895	-0.0329	0.0601
2452186.907829861	2001/10/04 09 :47 :16.500	0.1468	-0.4361	-0.0128	-0.0532
2452186.955653935	2001/10/04 10 :56 :08.500	0.1477	-0.4730	-0.0029	-0.0574
2452187.037968750	2001/10/04 12 :54 :40.500	0.0729	-0.5298	-0.0601	-0.0320
2452187.048854167	2001/10/04 13 :10 :21.000	0.1183	-0.5366	-0.0122	-0.0560
2452187.049409722	2001/10/04 13 :11 :09.000	0.0731	-0.5369	-0.0573	-0.0208
2452188.923188657	2001/10/06 10 :09 :23.500	-0.1086	0.5521	0.0356	0.0784
2452188.943356481	2001/10/06 10 :38 :26.000	-0.0925	0.5664	0.0480	0.0714
2452189.035237269	2001/10/06 12 :50 :44.500	-0.0779	0.6249	0.0439	0.0614
2452215.812789352	2001/11/02 07 :30 :25.000	0.1407	-0.7288	0.0477	0.0434
2452215.807893518	2001/11/02 07 :23 :21.999	0.1454	-0.7267	0.0512	0.0524
2452215.986886574	2001/11/06 12 :50 :44.500	0.0737	-0.7718	0.0291	-0.0098
2452215.981209491	2001/11/06 12 :50 :44.500	0.0738	-0.7714	0.0276	-0.0061
2452216.802500000	2001/11/06 12 :50 :44.500	-0.2043	-0.1906	-0.0414	-0.0804
2452216.804872685	2001/11/06 12 :50 :44.500	-0.1868	-0.1876	-0.0235	-0.0631
2452366.673096064	2002/04/02 04 :09 :15.500	0.1675	-0.3120	0.0567	-0.1140

TAB. 5.3: Statistiques pour l'ensemble des observations ajustées du satellite Linus de (22) Kalliope.

Ecart type en X	0.0514 "
Ecart type en Y	0.0637 "
Résidu moyen en X	0.0066 "
Résidu moyen en Y	-0.0010 "

FIG. 5.6: Comparaison des observations du satellite Linus de (22) Kalliope avec le modèle dynamique.



Conclusion

Nous avons vu deux aspects bien différents de la dynamique d'un satellite naturel. La première étude s'appliquait aux satellites internes de Jupiter. Elle est conditionnée par la complexité de l'environnement de la planète. La deuxième étude portait sur le mouvement d'un satellite d'astéroïde et se caractérise par la méconnaissance des paramètres orbitaux du système. Toutes deux sont régies par la qualité des observations des satellites étudiés.

J'ai participé durant ma thèse à de nombreuses campagnes d'observations des satellites de Jupiter afin de recueillir un grand nombre de positions observées de ces satellites. J'ai pu apprendre dans un premier temps les techniques d'observation, mais dans un deuxième temps comprendre les besoins et l'utilité que représente la modélisation du mouvement des satellites. En effet, sur les quatre satellites internes de Jupiter nous pouvons distinguer deux groupes, Amalthée et Thébé, qui sont les plus éloignés mais aussi les plus lumineux. Métis et Adrastée évoluent dans les anneaux, le contraste avec la planète est énorme. Je n'ai pas observé Adrastée car il était inaccessible pour les instruments que j'ai utilisés. On possède à l'heure actuelle très peu d'observations de ces satellites. Pour qu'une observation soit couronnée de succès, il faut détecter le satellite d'une part mais aussi avoir un rapport signal sur bruit suffisamment grand pour la mesure de l'objet sur l'image. Il faut en outre, d'autres objets dans le champ pour mesurer les constantes de plaques et la mesure de l'objet sur l'image. Ces objets peuvent être des satellites galiléens dans le champ, mais ils sont en général saturés sur l'image et peuvent être de mauvaises références. Il y aussi les étoiles du champ, la taille réduite des détecteurs fait que ces étoiles sont mal connues. L'erreur en position du catalogue USNO-A2, que j'ai utilisé pour nos observations, était de 0.5 seconde de degré. Ces références influent fortement la mesure finale de la position de l'objet. Maintenant, si on cherche à étudier Adrastée et Métis, il existe deux références qui peuvent être utilisées. Ces références sont données par le modèle dynamique des satellites Amalthée et Thébé. Donc, si nous voulons dans l'avenir étudier la physique qui régit le mouvement des corps dans les anneaux de Jupiter, nous aurons besoin pour les observations terrestres de connaître précisément la position des satellites Thébé et Amalthée. Il est possible avec des télescopes de taille modeste de faire de l'astrométrie sur Amalthée et Thébé. Ceci prouve qu'il y a encore des domaines de recherches ouverts pour ce type de télescope.

La modélisation du mouvement d'un satellite naturel met en valeur plusieurs notions théoriques et numériques. J'ai construit une représentation numérique du mouvement des satellites Thébé et Amalthée, nommée NJO2004A. Le modèle dynamique restreint aux coefficients d'aplatissement zonaux de la planète J2 et J4, et aux perturbations gravitationnelles des satellites galiléens et du Soleil, suffisent au vu des résidus obtenus pour les observations de ces satellites.

La méthode numérique que j'ai employée montre ses limites sur un temps d'intégration très long, mais les algorithmes sont mis à rude épreuve car les satellites tournent extrêmement vite avec des périodes de rotation allant de 16 heures pour Thébé à 8 heures pour Métis. Je propose deux représentations numériques des satellites Thébé et Amalthée sur trente ans. La première est issue de l'intégration numérique (nommée NJO2004A), l'autre est destinée au serveur de calcul de l'IMCCE et est basée sur le calcul des coefficients de Tchebychev. Ces représentations sont données pour des précisions inférieures à 300 mas jusqu'en 2010 environ, vu la propagation des erreurs de l'intégrateur numérique et la qualité des observations qui ont servi à l'ajustement. Dans l'avenir, si nous voulons fournir une solution à plus long terme, il faudra continuer à observer ces satellites en mettant l'accent sur la qualité des images et sur la méthode de réduction employée. D'un point de vue nu-

mérique nous devons obligatoirement augmenter la précision, ce qui ne fera qu'augmenter les temps de calculs. Enfin, on pourra utiliser une autre méthode en ce sens où, la solution que je propose peut servir de base à l'ajustement d'une solution analytique.

Si la complexité du système jovien rend passionnante l'étude dynamique d'un corps orbitant au voisinage de la planète, l'étude d'un satellite d'astéroïde est tout aussi intéressante sous d'autres aspects. Cette étude est un terrain vierge puisque nos connaissances des paramètres physiques de ces corps sont limitées à quelques uns d'entre eux. L'analyse Doppler-Radar peut nous apporter des informations sur leur forme, l'étude photométrique nous donner ses paramètres de rotation, mais l'information directe de leur masse nous est directement donnée par la modélisation du mouvement d'un satellite. Par la troisième loi de Kepler, la période de rotation du satellite est fonction de la masse du corps primaire. J'ai utilisé la méthode numérique des satellites de Jupiter simplifiée pour le cas d'un satellite d'astéroïde, celui de (22) Kalliope. L'orbite calculée après ajustement, respecte le plan d'orbite observé du satellite au cours des mois. Mais les résidus sont bien trop grands, ce qui peut être provoqué par l'erreur faite sur la masse du corps primaire et/ou du corps secondaire. J'ai considéré le corps primaire homogène et de forme proche d'un ellipsoïde avec un aplatissement aux pôles défini par le paramètre J_2 . Le satellite orbite à 1000 kilomètres, il est très sensible à la masse du corps central qui doit être connue à 0.1% près. Le paramètre d'aplatissement rend le problème tout aussi sensible. Pour continuer cette étude, il sera certainement nécessaire de considérer le champ de gravité du corps central en fonction de sa forme.

La recherche sur les astéroïdes binaires va s'intensifier dans les années futures. L'optique adaptative y est pour beaucoup dans ce domaine. Nous aurons bientôt plusieurs systèmes doubles d'astéroïdes à étudier. Nous pourrions évaluer leur masse et leur densité, autant d'informations se rajouteront à notre connaissance. La prédiction d'occultation stellaire nous permettra de confirmer nos études. Plus tard, la mission Gaïa permettra la détection systématique et directe d'un grand nombre de ces corps.

Troisième partie

Annexes

Annexe A

Bilan statistique des Résidus

Observations	Année(s)	Nombre	X	X	Y	Y
			Moy	DevStand	Moy	DevStand
C.Veiga et al.	1995-2001	318	11.1	237.1	482.7	208.4
Pascu et al.	2000-2001	17	-312.9	471.5	361.4	160.0
Kulyk et al.	1998-2000	108	-35.7	137.7	-26.7	117.5
Colas et al.	2001	102	-382.9	230.7	252.6	266.4
Colas	1988-1990	221	-63.1	432.7	219.6	343.3
Colas	1988-1990	741	-456.4	998.8	109.1	640.6
Pascu	1985	7	-990.6	183.0	292.1	94.6
Pascu	1996	15	-28.1	187.8	7.0	282.3
Total	1985-2001	788	-83.7	337.6	120.6	274.4

TAB. A.1: Résultat des quantités observées moins calculées sur les différents ensembles d'observations pour le satellite Thébé. Les positions théoriques ont été calculées par l'intégration numérique NJO2004A. Les unités sont en seconde de degré.

Observations	Année(s)	Nombre	X	X	Y	Y
			Moy	DevStand	Moy	DevStand
C.Veiga et al.	1995-2001	318	-97.4	202.0	30.6	190.8
Pascu et al.	2000-2001	17	-451.0	468.1	272.5	150.9
kulyk et al.	1998-2000	108	-6.4	130.1	-19.3	110.2
Colas et al.	2001	102	-330.6	235.5	313.9	253.7
Colas	1988-1990	221	35.5	428.6	310.8	450.9
Colas	1988-1990	741	-320.1	907.0	152.9	745.6
Pascu	1985	7	-251.9	178.0	268.5	92.8
Pascu	1996	15	-39.7	184.0	4.6	286.3
Total	1985-2001	788	-085.7	313.8	145.8	323.5

TAB. A.2: Résultat des quantités observées moins calculées sur les différents ensembles d'observations pour le satellite Thébé. Les positions théoriques ont été calculées par l'éphéméride du JPL. Les unités sont en seconde de degré.

Observations	Année(s)	Nombre	X	X	Y	Y
			Moy	DevStand	Moy	DevStand
C.Veiga et al.	1995-2001	445	-61.7	248.6	134.9	273.1
Pascu et al.	2000	11	-3.2	103.9	363.1	140.6
Ianna	1977	2	455.5	332.4	-116.3	71.2
kulyk	1998-2000	86	-9.4	130.4	-124.2	111.0
Mulholand	1976-1978	3	-84.9	508.7	224.6	183.9
Nicholson	1988	16	010.5	242.8	-121.8	127.9
Pascu	1985	24	193.8	176.0	273.5	144.2
Sudbury	1967	73	-115.3	305.3	-162.5	362.7
Total	1967-2001	660	-47.3	247.8	70.5	292.5

TAB. A.3: Résultat des quantités observées moins calculées sur les différents ensembles d'observations pour le satellite Amalthée. Les positions théoriques ont été calculées par l'intégration numérique NJO2004A. Les unités sont en seconde de degré.

Observations	Année(s)	Nombre	X	X	Y	Y
			Moy	DevStand	Moy	DevStand
C.Veiga et al.	1995-2001	445	-92.6	245.2	86.1	292.7
Pascu et al.	2000	11	188.4	121.0	357.8	117.9
Ianna	1977	2	472.1	319.9	24.5	81.0
kulyk	1998-2000	86	-19.7	116.8	-60.7	95.3
Mulholand	1976-1978	3	-40.6	585.2	163.6	42.0
Nicholson	1988	16	-20.6	236.4	-200.4	156.7
Pascu	1985	24	203.7	181.2	391.6	147.5
Sudbury	1967	73	156.6	318.1	-11.6	247.4
Total	1967-2001	660	-36.4	259.2	65.0	277.9

TAB. A.4: Résultat des quantités observées moins calculées sur les différents ensembles d'observations pour le satellite Amalthée. Les positions théoriques ont été calculées par l'éphéméride du JPL. Les unités sont en seconde de degré.

Annexe B

Représentation graphique des OMC

B.1 Observations de Thébé

Fig.	Observations	Ephémérides
B.1	Veiga C., Vieira-Martins R., 1995-2001, LNA Itajuba Brésil.	NJO2004A
B.2	Veiga C., Vieira-Martins R., 1995-2001, LNA Itajuba Brésil.	JPL
B.3	Colas F., Vachier F., 2001, Pic du Midi, France.	NJO2004A
B.4	Colas F., Vachier F., 2001, Pic du Midi, France.	JPL
B.5	Colas F., 1991, Pic du Midi, France.	NJO2004A
B.6	Colas F., 1991, Pic du Midi, France.	JPL
B.7	Pascu D., 1985, USNO-Flagstaff, USA.	NJO2004A
B.8	Pascu D., 1985, USNO-Flagstaff, USA.	JPL
B.9	Pascu D., 1996, USNO-Flagstaff, USA.	NJO2004A
B.10	Pascu D., 1996, USNO-Flagstaff, USA.	JPL
B.11	Pascu D., Vachier F., 2001, USNO-Flagstaff, USA.	NJO2004A
B.12	Pascu D., Vachier F., 2001, USNO-Flagstaff, USA.	JPL
B.13	Kulyk et al., 1998-2000, Pik Terskol, Ukraine.	NJO2004A
B.14	Kulyk et al., 1998-2000, Pik Terskol, Ukraine.	JPL

Observations Veiga C., Vieira-Martins R., 1995-2001, LNA Itajuba, Brasil. [UAI=874]

Satellite Thébé

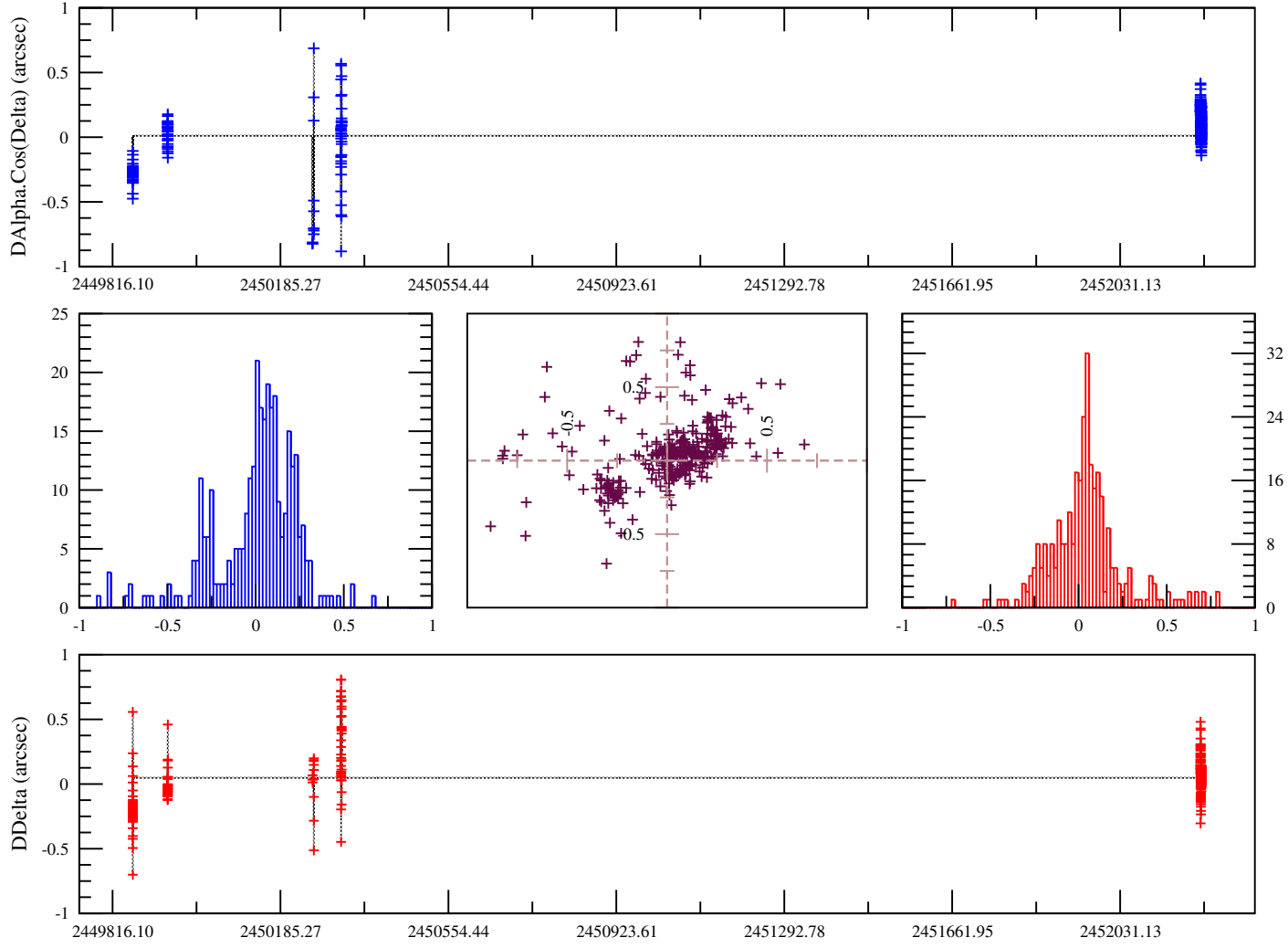


FIG. B.1: Observations Veiga C., Vieira-Martins R., 1995-2001, LNA Itajuba Brasil. OmC sur les observations de Thébé calculés avec l'éphéméride NJO2004A

Observations Veiga C., Vieira-Martins R., 1995-2001, LNA Itajuba, Brasil. [UAI=874]
 Satellite Thébé - JPL Ephemeris

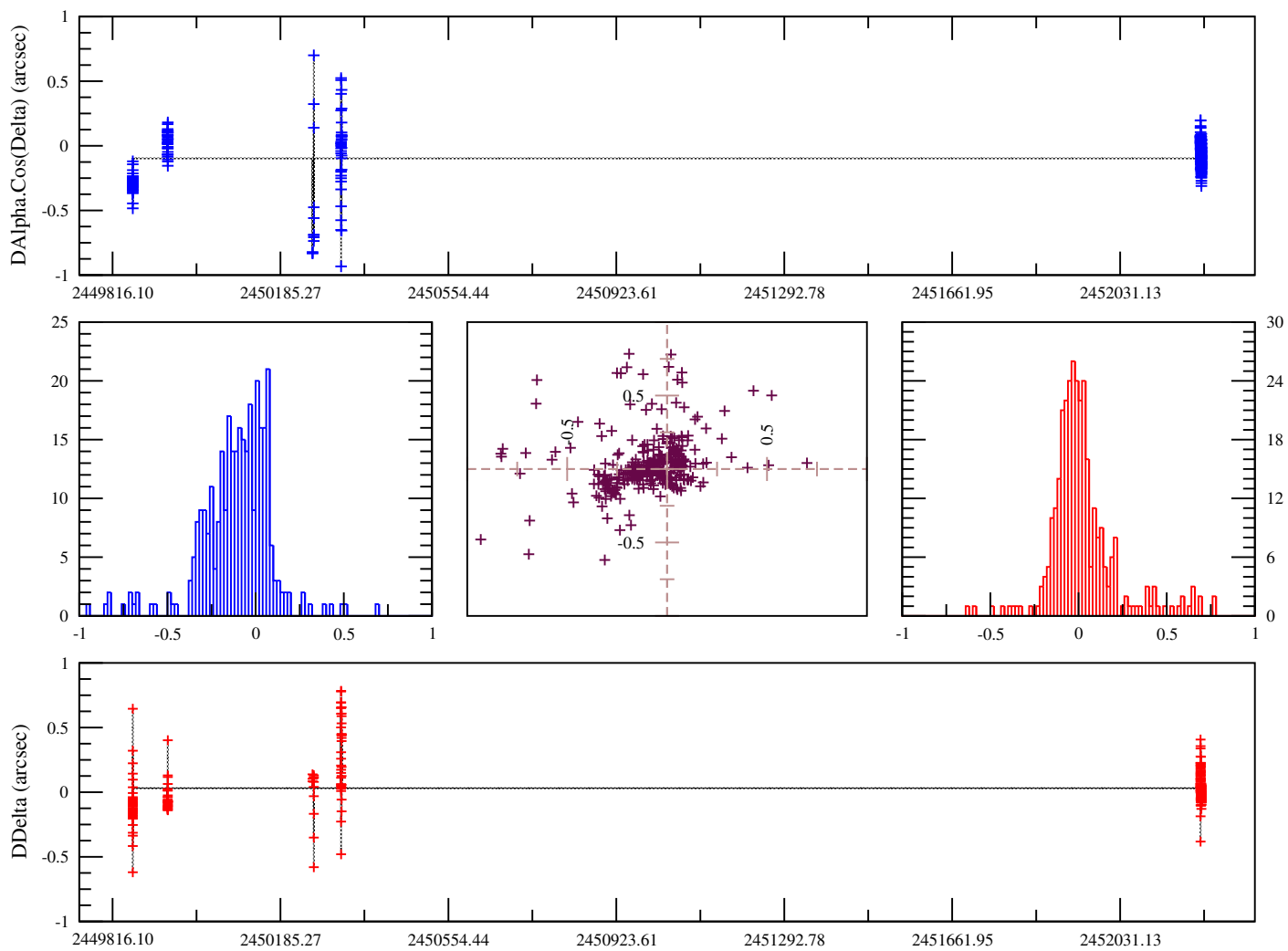


FIG. B.2: Observations Veiga C., Vieira-Martins R., 1995-2001, LNA Itajuba, Brasil. OmC sur les observations de Thébé calculés avec l'éphéméride du JPL

Observations Mission Pic du Midi Décembre 2001, F. Colas, F. Vachier [UAI:586]

Satellite Thébé

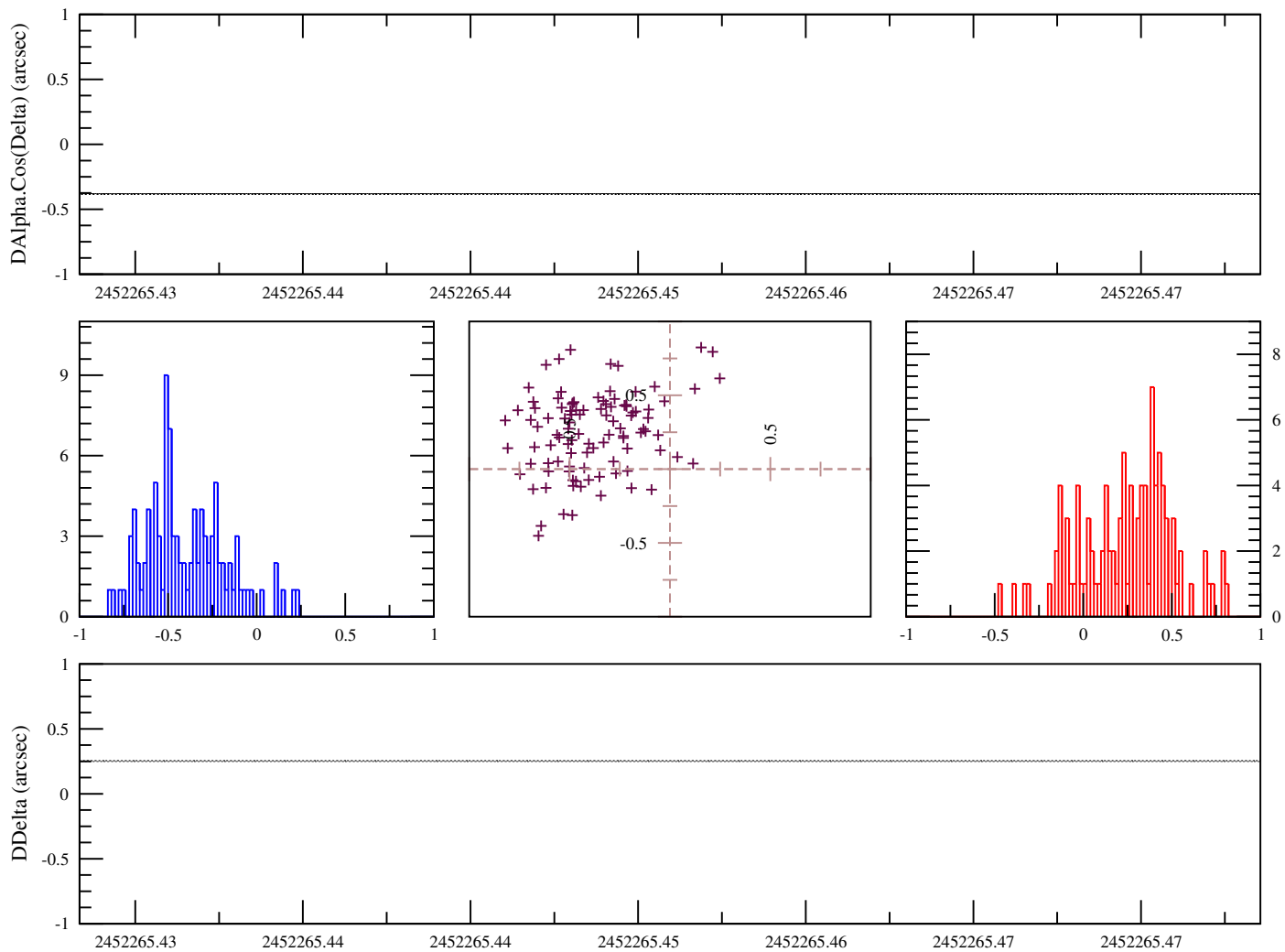


FIG. B.3: Observations Colas F., Vachier F., 2001, Pic du Midi, France. OmC sur les observations de Thébé calculés avec l'éphéméride NJO2004A

Observations Mission Pic du Midi Décembre 2001, F. Colas, F. Vachier [UAI:586]
Satellite Thébé - JPL Ephemeris

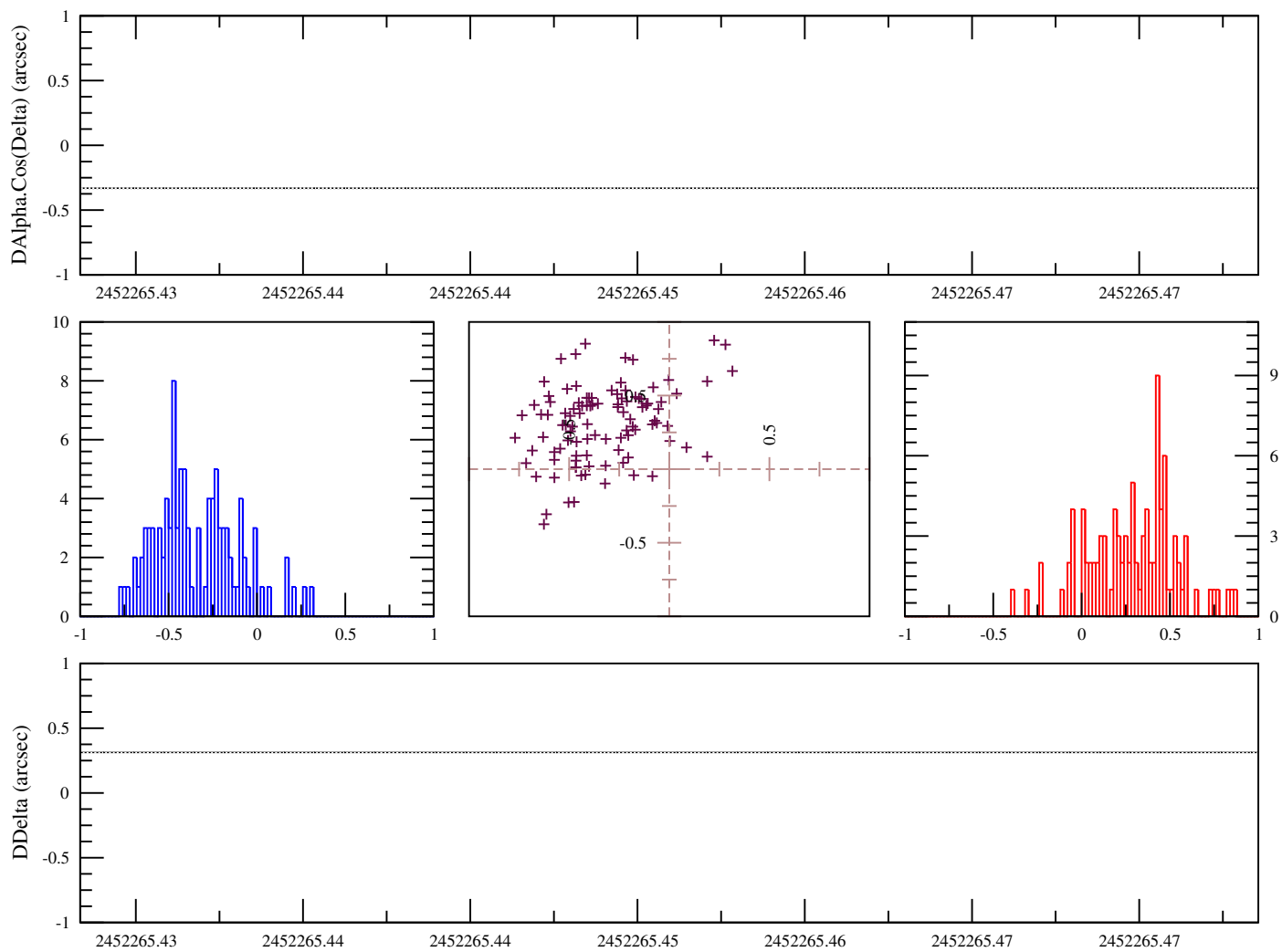


FIG. B.4: Observations Colas F., Vachier F., 2001, Pic du Midi, France. OmC sur les observations de Thébé calculées avec l'éphéméride du JPL

Observations Colas 1991, Pic du Midi, France. [UAI:586]

Satellite Théb 

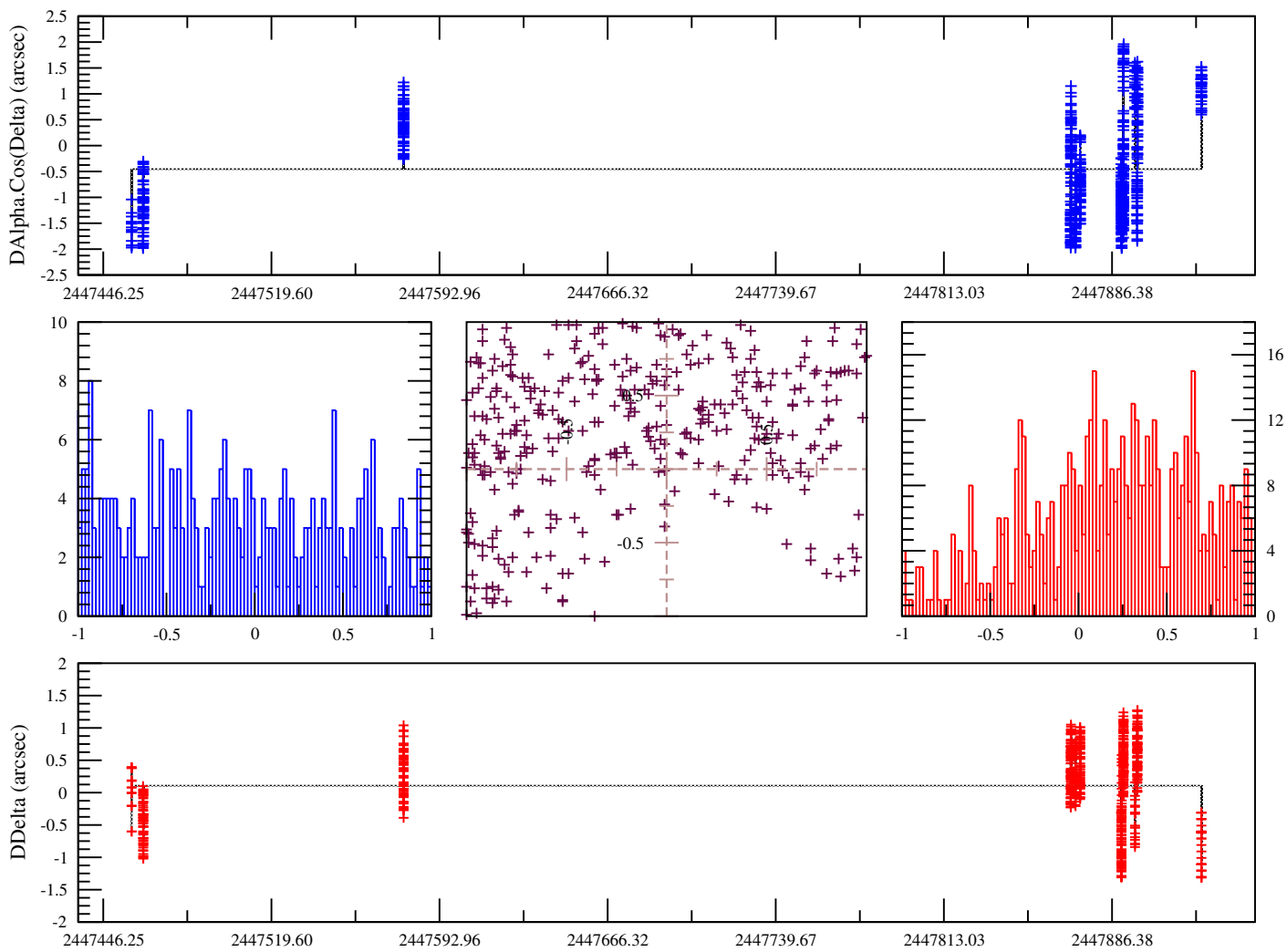


FIG. B.5: Observations Colas F., 1991, Pic du Midi, France. OmC sur les observations de Th b  calculées avec l' ph m ride NJO2004A

Observations Colas 1991, Pic du Midi, France. [UAI:586]
 Satellite Théb e - JPL Ephemeris

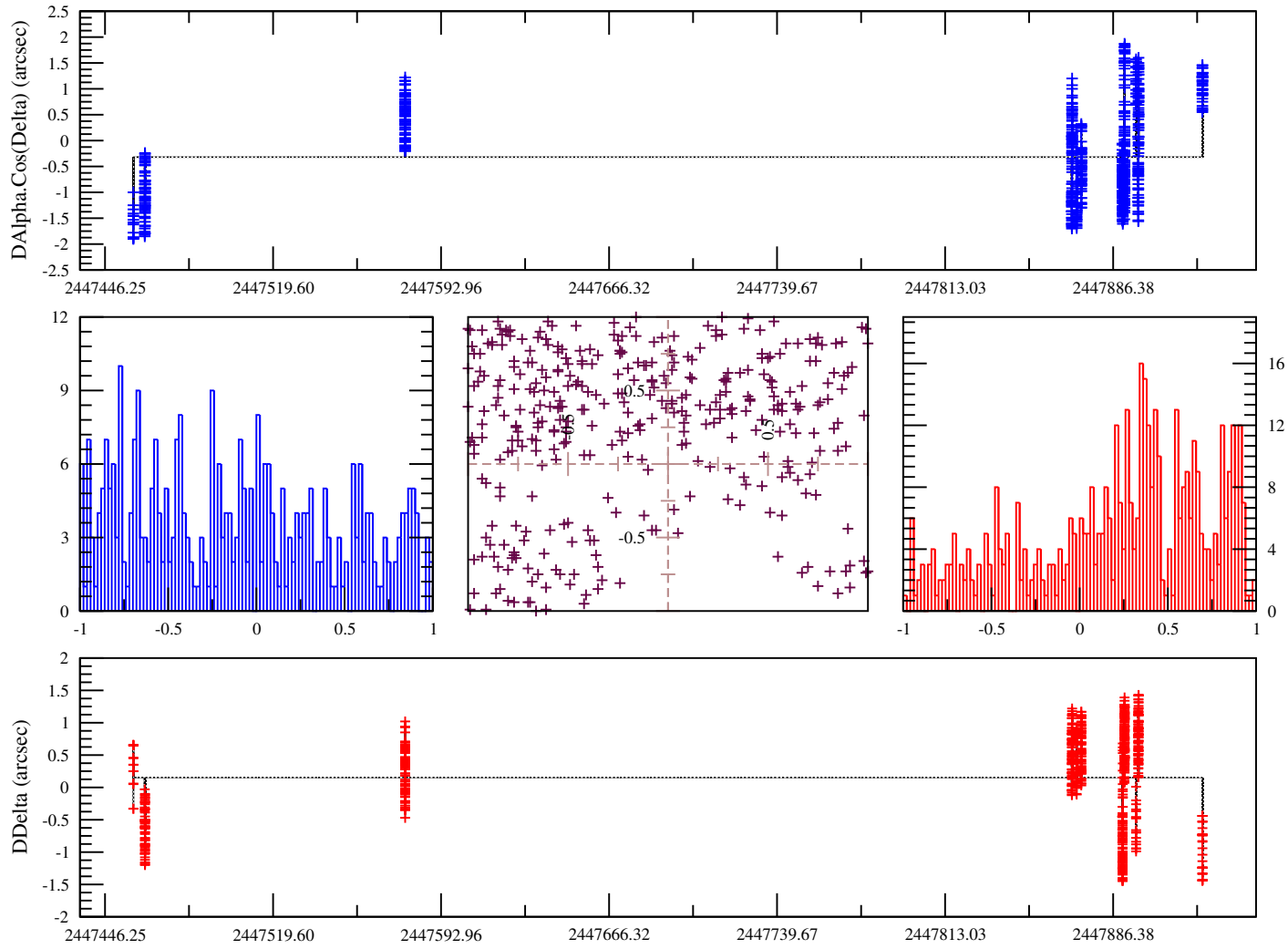


FIG. B.6: Observations Colas F., 1991, Pic du Midi, France. OmC sur les observations de Th e calculées avec l'éphéméride du JPL

Observations Pascu 1985, 20 juin, Flagstaff, USNO, USA. [UAI=689]
 Satellite Thébé

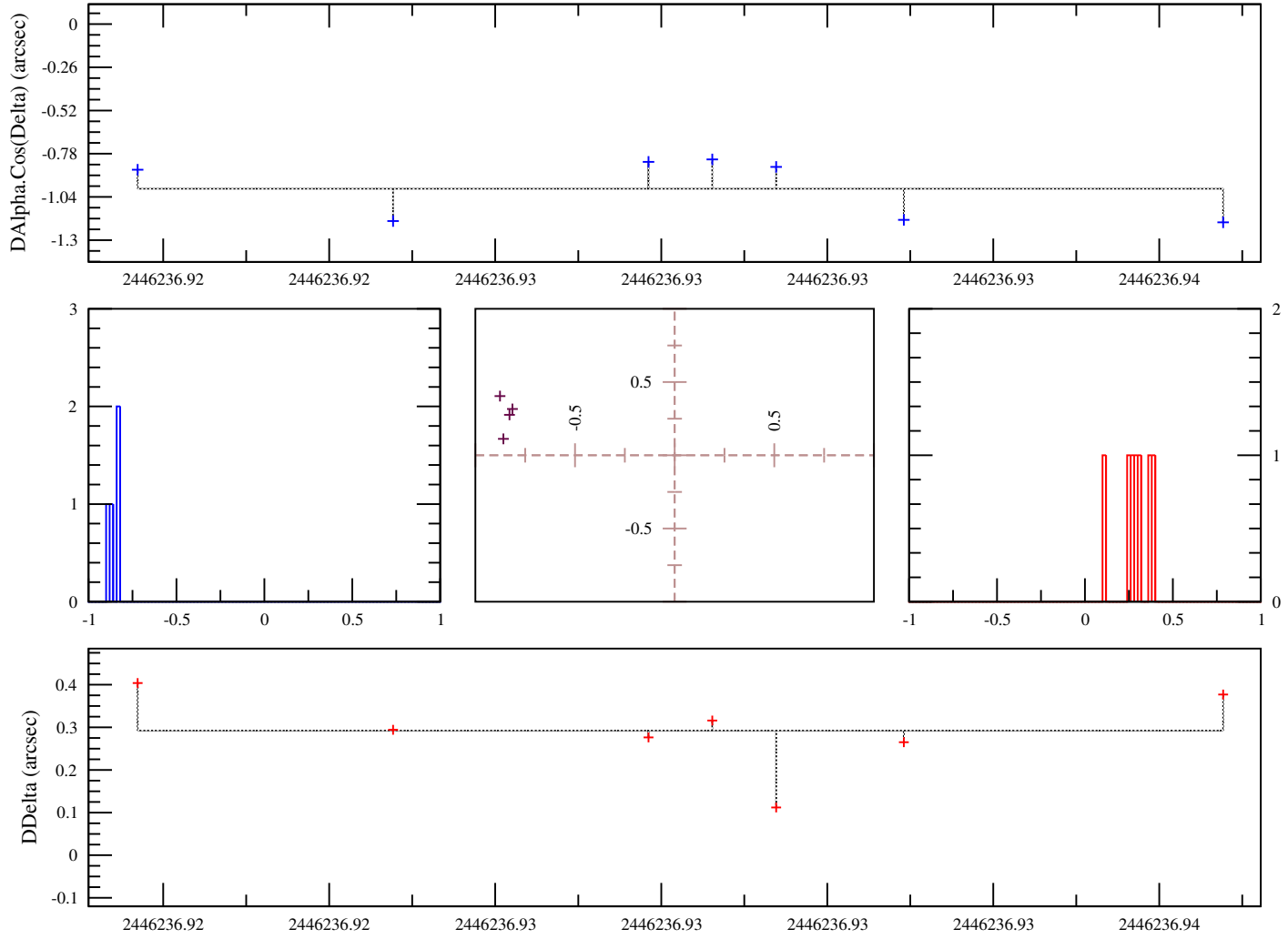


FIG. B.7: Observations Pascu D., 1985, USNO-Flagstaff, USA. OmC sur les observations de Thébé calculés avec l'éphéméride NJO2004A

Observations Pasco 1985, 20 juin, Flagstaff, USNO, USA. [UAI=689]
 Satellite Thébé - JPL Ephemeris

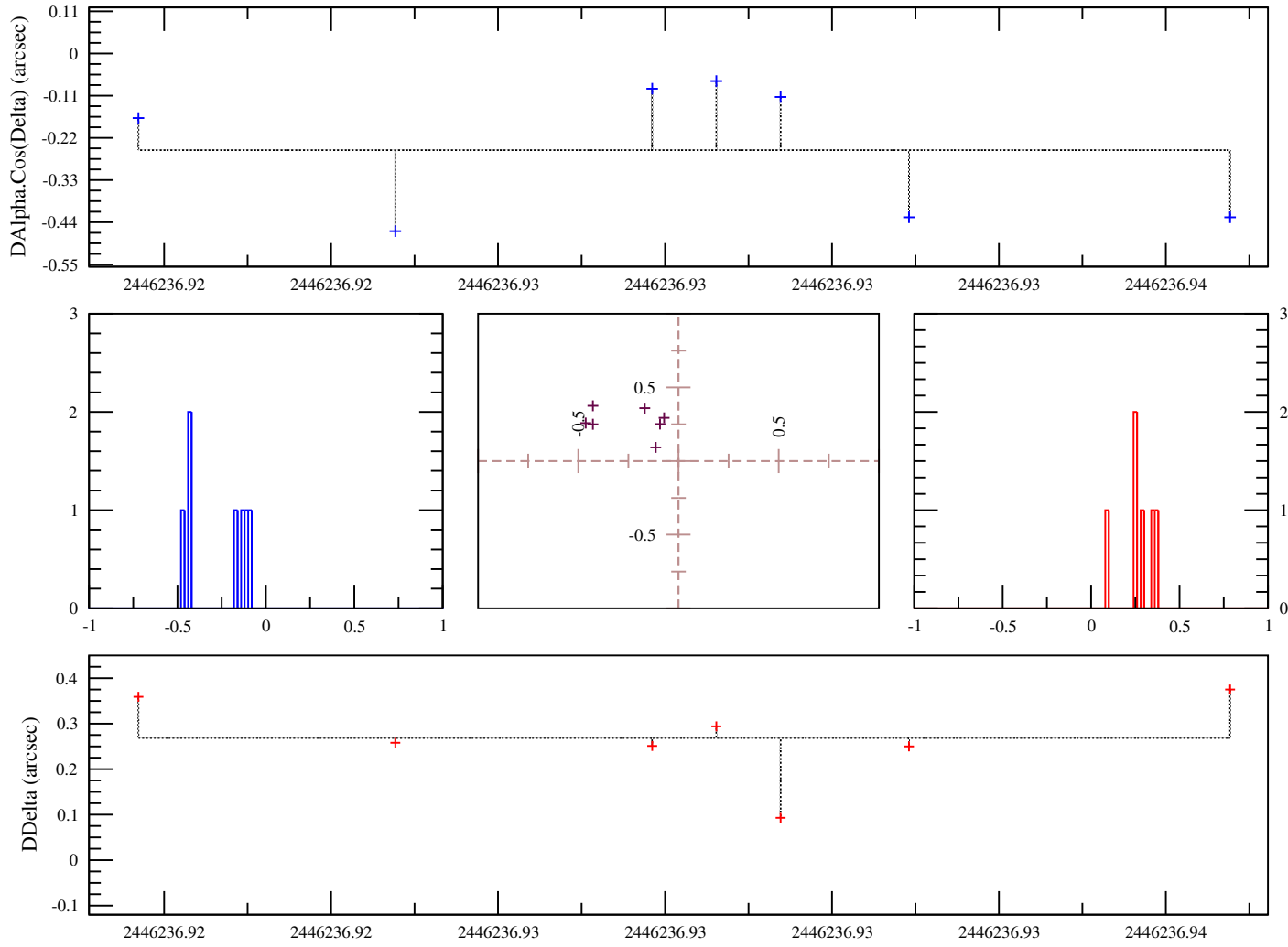


FIG. B.8: Observations Pasco D., 1985, USNO-Flagstaff, USA. OmC sur les observations de Thébé calculés avec l'éphéméride du JPL

Observations Pascu 1996 et 1997, Flagstaff, USNO, USA. [UAI=689]

Satellite Thébé

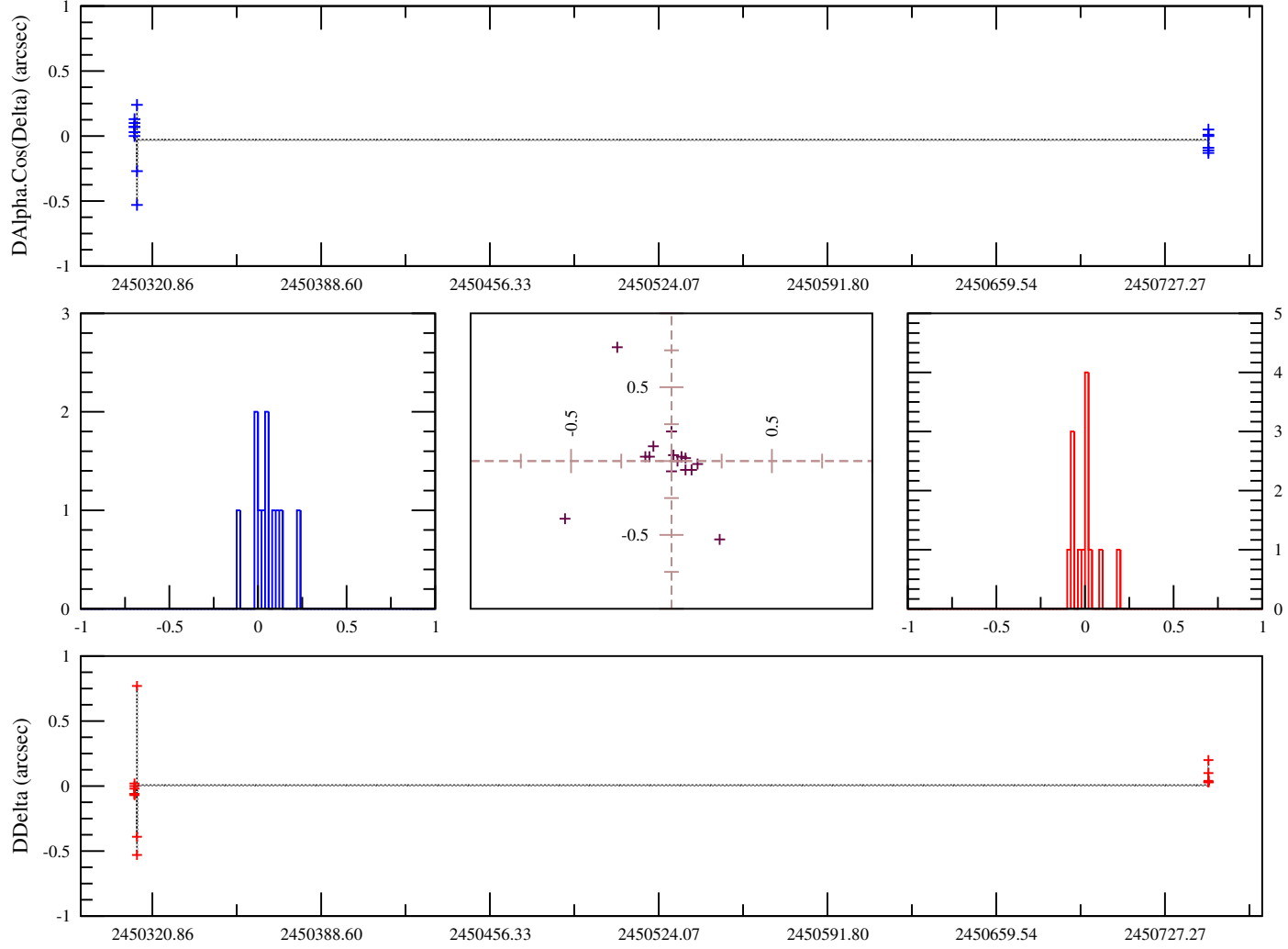


FIG. B.9: Observations Pascu D., 1996, USNO-Flagstaff, USA. OmC sur les observations de Thébé calculés avec l'éphéméride du JPL

Observations Pasco 1996 et 1997, Flagstaff, USNO, USA. [UAI=689]
 Satellite Thébé - JPL Ephemeris

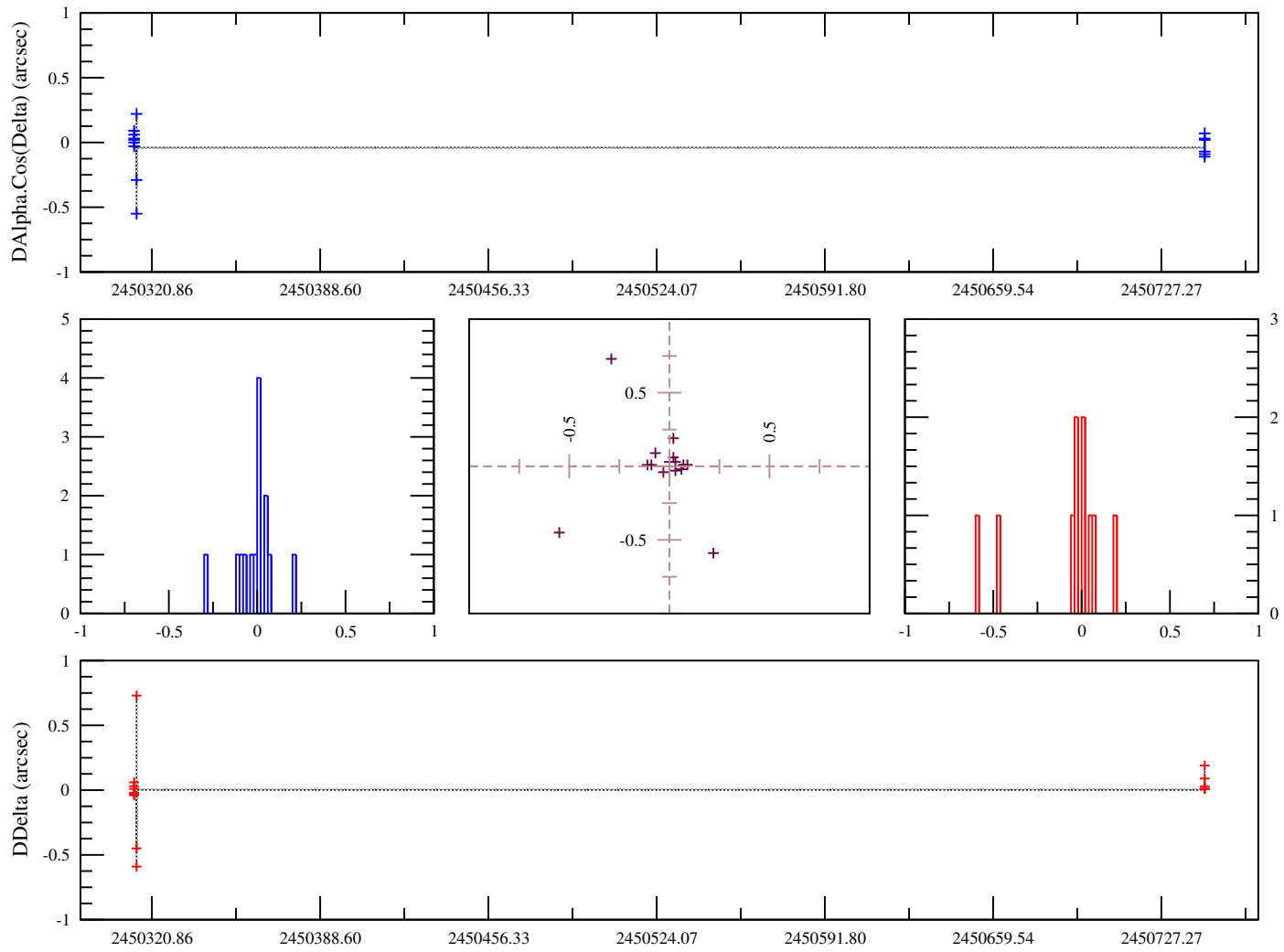


FIG. B.10: Observations Pasco D., 1996, USNO-Flagstaff, USA. OmC sur les observations de Thébé calculés avec l'éphéméride du JPL

Observations Mission Flagstaff, 2000-2001, USNO-USA. [UAI=689]

Satellite Thébé

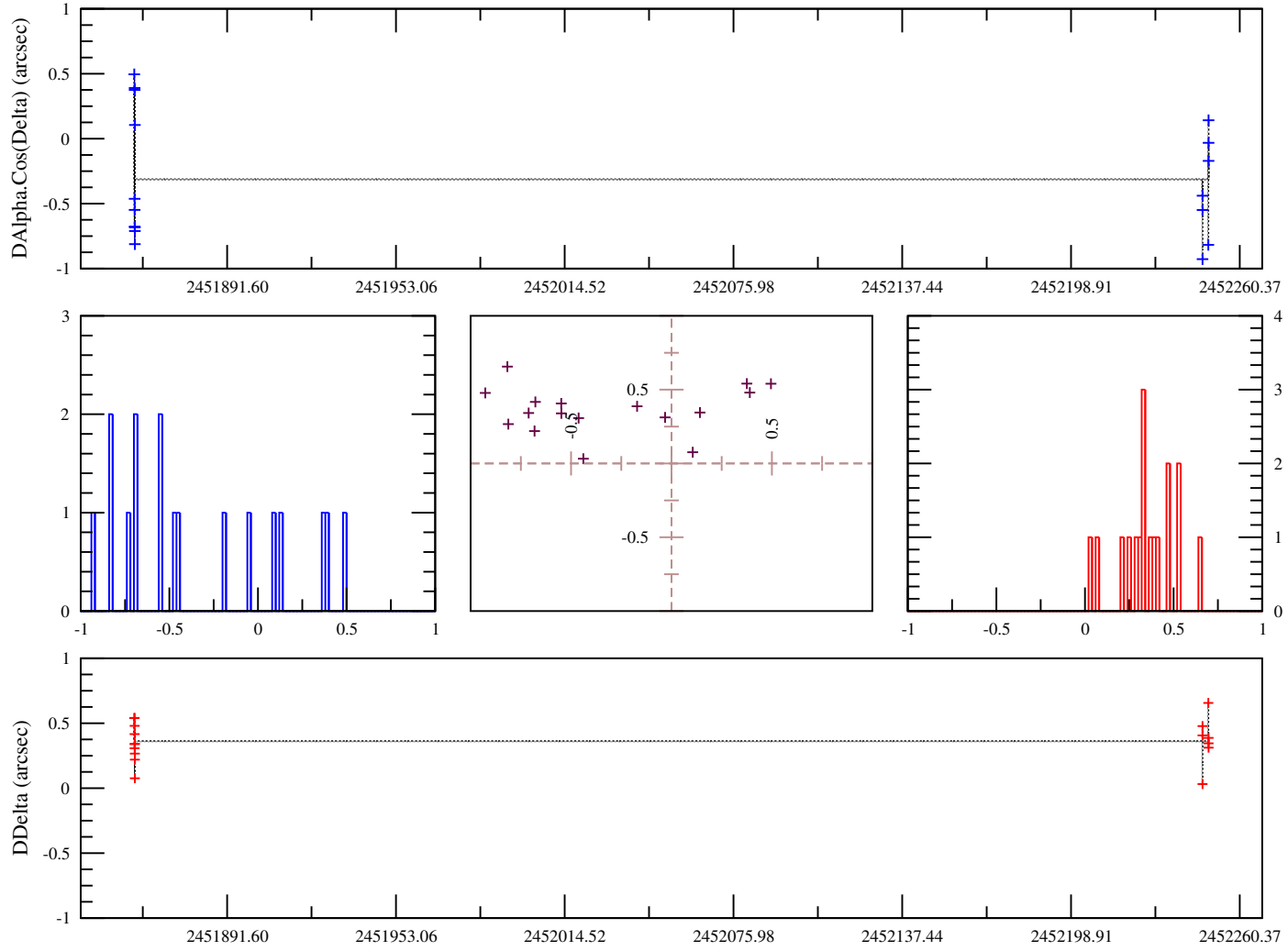


FIG. B.11: Observations Pasco D., Vachier F., 2001, USNO-Flagstaff, USA. OmC sur les observations de Thébé calculés avec l'éphéméride du JPL

Observations Mission Flagstaff, 2000-2001, USNO-USA. [UAI=689]
 Satellite Thébé - JPL Ephemeris

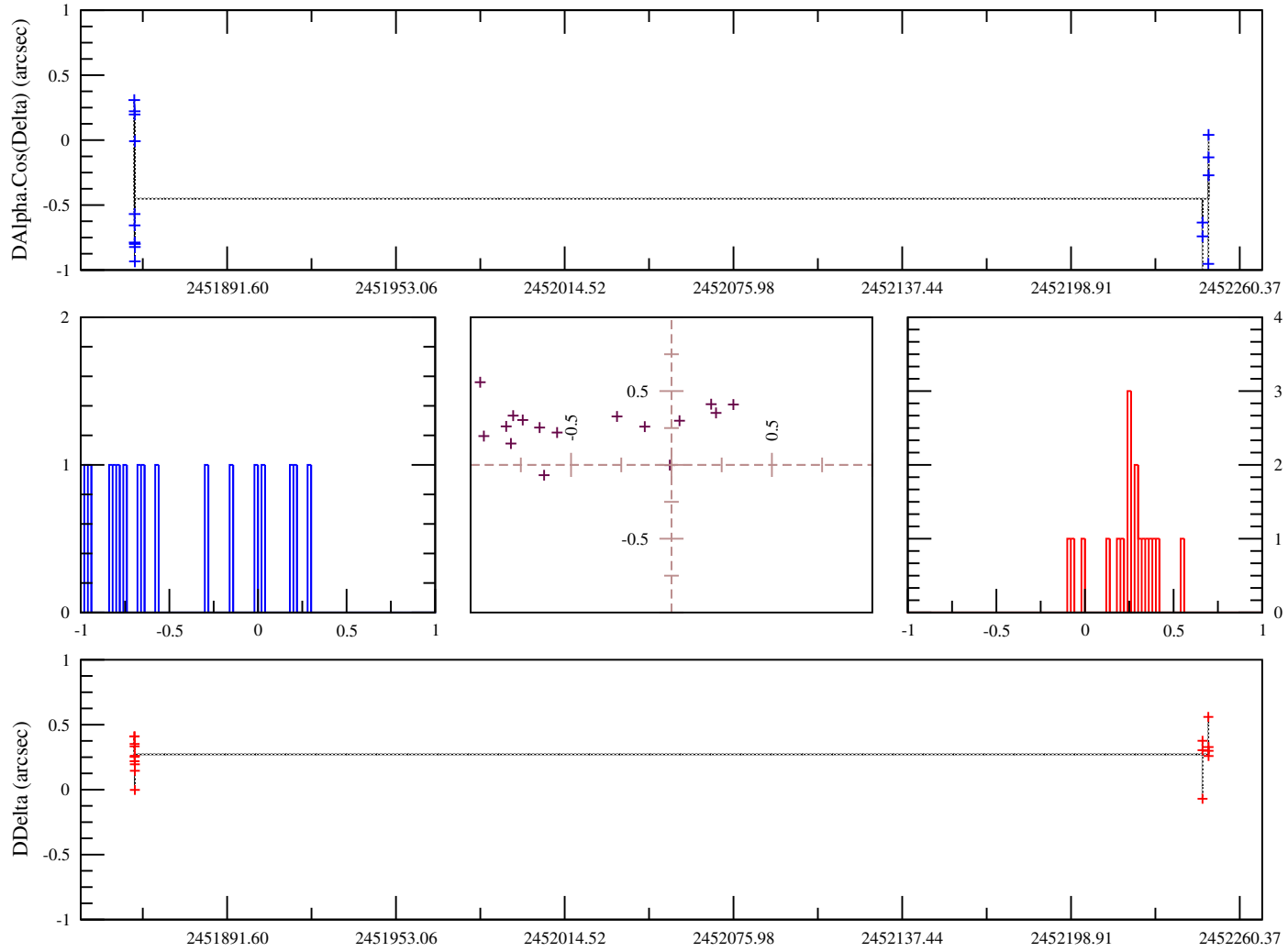


FIG. B.12: Observations Pasco D., Vachier F., 2001, USNO-Flagstaff, USA. OMC sur les observations de Thébé calculées avec l'éphéméride du JPL

Observations Kulyk-Ledovskaya, 1998-1999, Pik Terskol, Ukraine. [UAI=B18]

Satellite Thébé

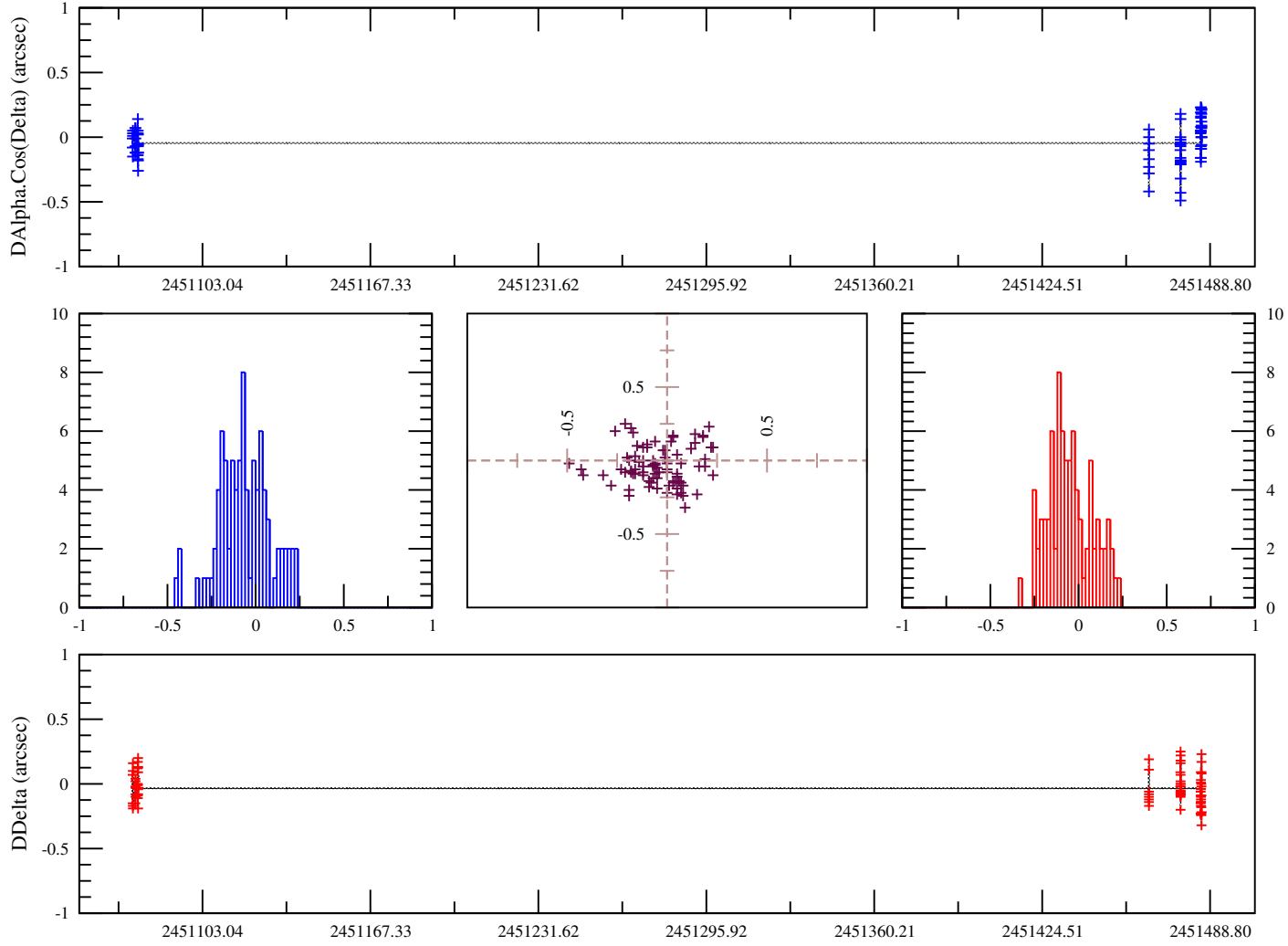


FIG. B.13: Observations Kulyk et al., 1998-2000, Pik Terskol, Ukraine. OmC sur les observations de Thébé calculés avec l'éphéméride du JPL

Observations Kulyk-Ledovskaya, 1998-1999, Pik Terskol, Ukraine. [UAI=B18]
 Satellite Thébé - JPL Ephemeris

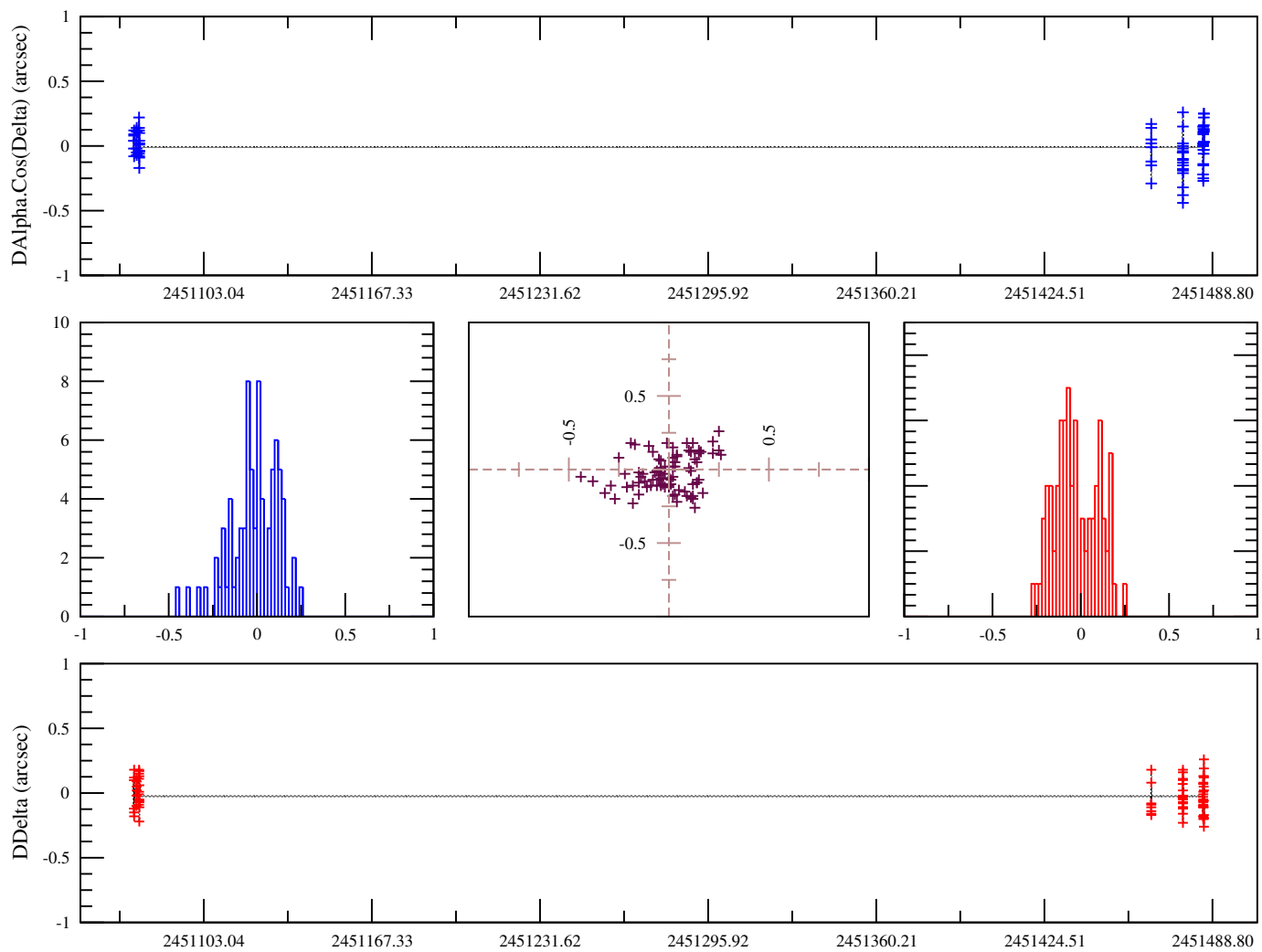


FIG. B.14: Observations Kulyk et al., 1998-2000, Pik Terskol, Ukraine. OmC sur les observations de Thébé calculées avec l'éphéméride du JPL

B.2 Observations d'Amalthée

Fig.	Observations	Ephémérides
B.15	Veiga C., Vieira-Martins R., 1995-2001, LNA Itajuba Brésil.	NJO2004A
B.16	Veiga C., Vieira-Martins R., 1995-2001, LNA Itajuba Brésil.	JPL
B.17	Observations Nicholson, 1991, Mt Palomar USA.	NJO2004A
B.18	Observations Nicholson, 1991, Mt Palomar USA.	JPL
B.19	Pascu D., Vachier F., 2000, USNO-Flagstaff, USA.	NJO2004A
B.20	Pascu D., Vachier F., 2000, USNO-Flagstaff, USA.	JPL
B.21	Pascu D., 1985, USNO-Flagstaff, USA.	NJO2004A
B.22	Pascu D., 1985, USNO-Flagstaff, USA.	JPL
B.23	Ianna P.A.,1979, Mc Cormick, USA.	NJO2004A
B.24	Ianna P.A.,1979, Mc Cormick, USA.	JPL
B.25	Sudbury P.V., 1969, Obs. Kottomia, Egypte.	NJO2004A
B.26	Sudbury P.V., 1969, Obs. Kottomia, Egypte.	JPL
B.27	Mulholand, 1977, Obs. McDonald, USA.	NJO2004A
B.28	Mulholand, 1977, Obs. McDonald, USA.	JPL
B.29	Kulyk et al., 1998-2000, Pik Terskol, Ukraine.	NJO2004A
B.30	Kulyk et al., 1998-2000, Pik Terskol, Ukraine.	JPL

Observations Veiga C., Vieira-Martins R., 1995-2001, LNA Itajuba, Brasil.[UAI:874]

Satellite Amalthee

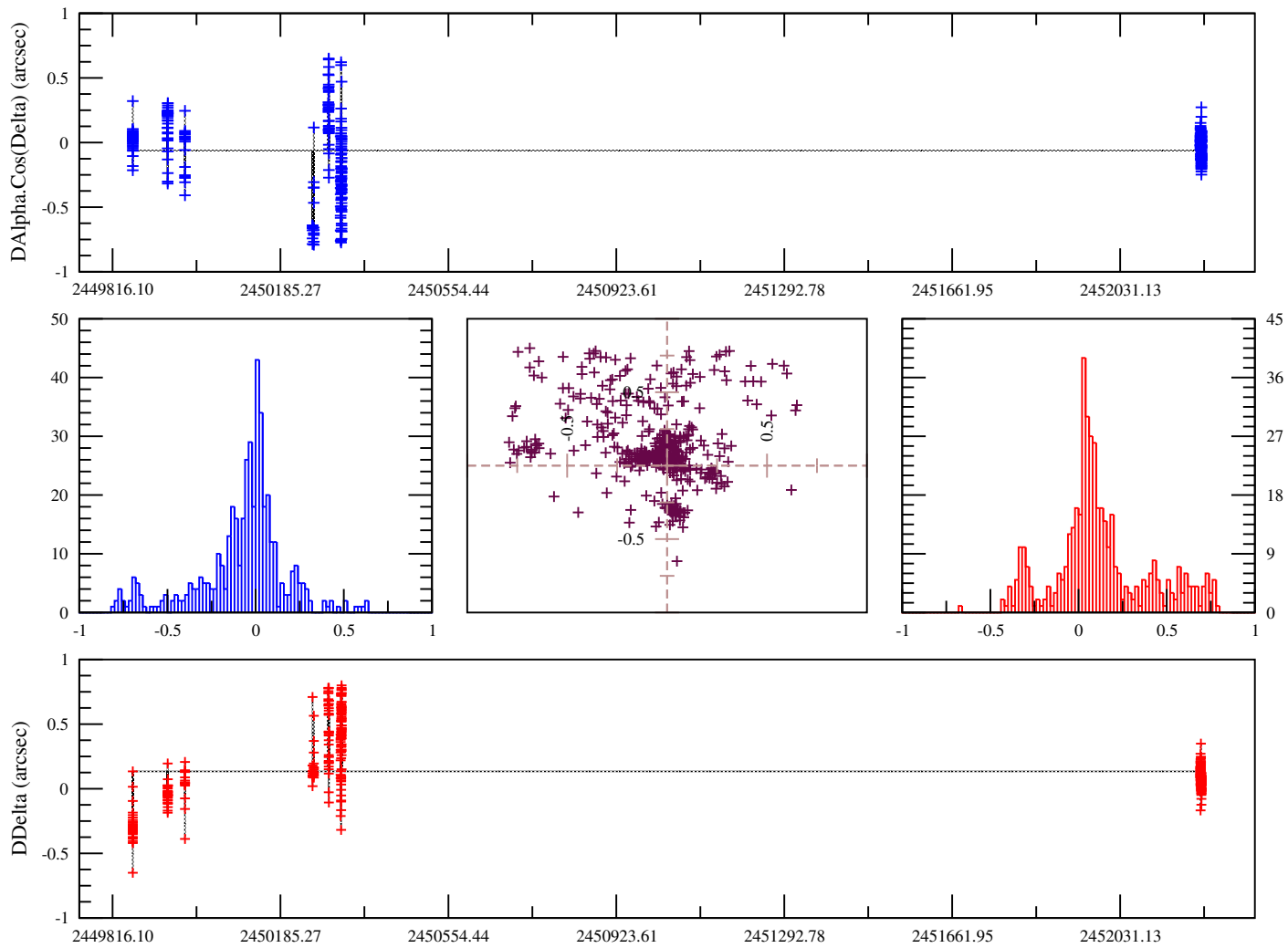


FIG. B.15: Observations Veiga C., Vieira-Martins R., 1995-2001, LNA Itajuba Brasil. OmC sur les observations d'Amalthee calculés avec l'éphéméride NJO2004A

Observations Veiga C., Vieira-Martins R., 1995-2001, LNA Itajuba, Brasil.[UAI:874]
 Satellite Amalthée - JPL Ephemeris

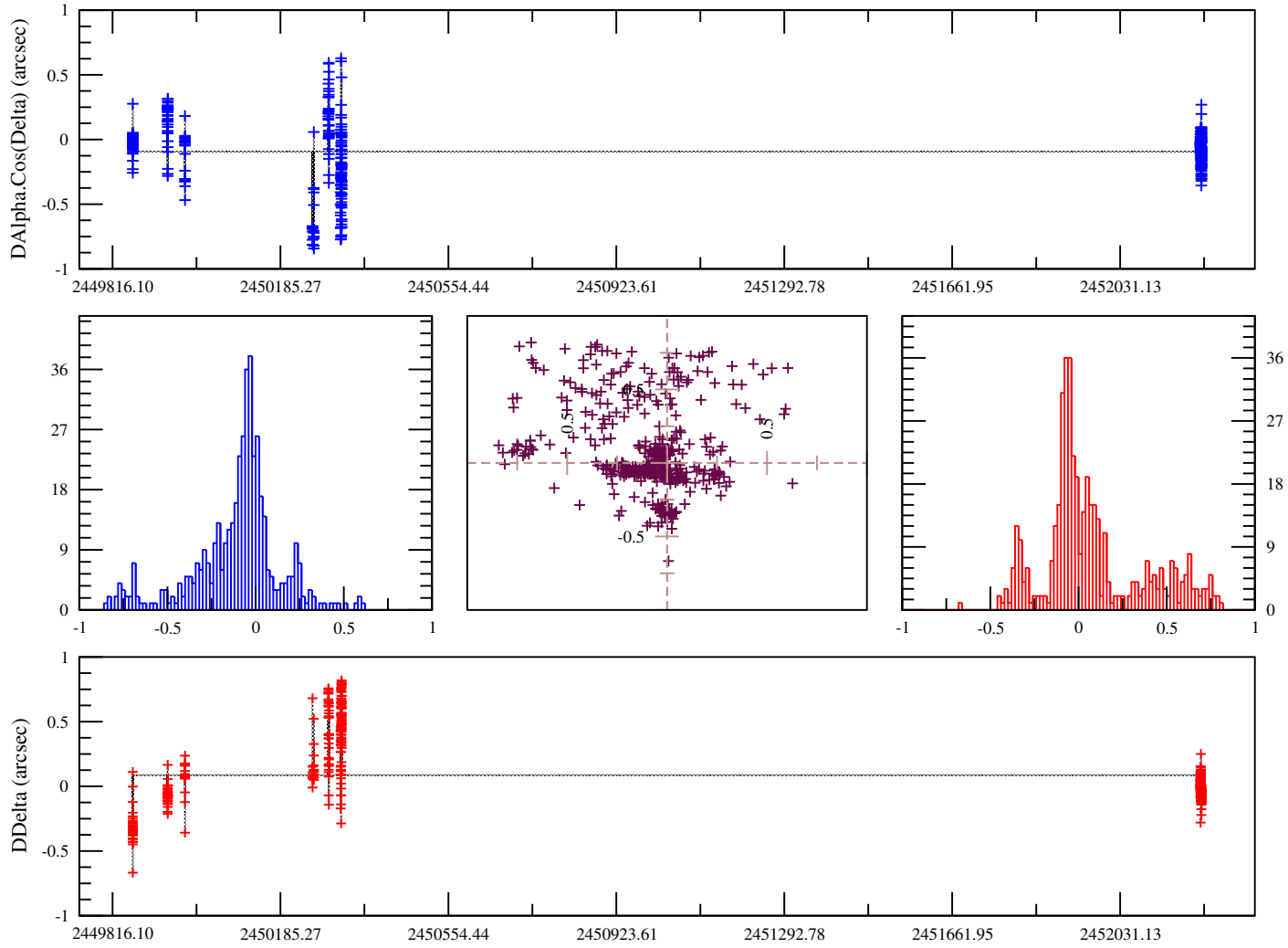


FIG. B.16: Observations Veiga C., Vieira-Martins R., 1995-2001, LNA Itajuba Brasil. OmC sur les observations d'Amalthée calculés avec l'éphéméride du JPL

Observations Nicholson, 1991, Mt Palomar [UAI=675]

Satellite Amalthée

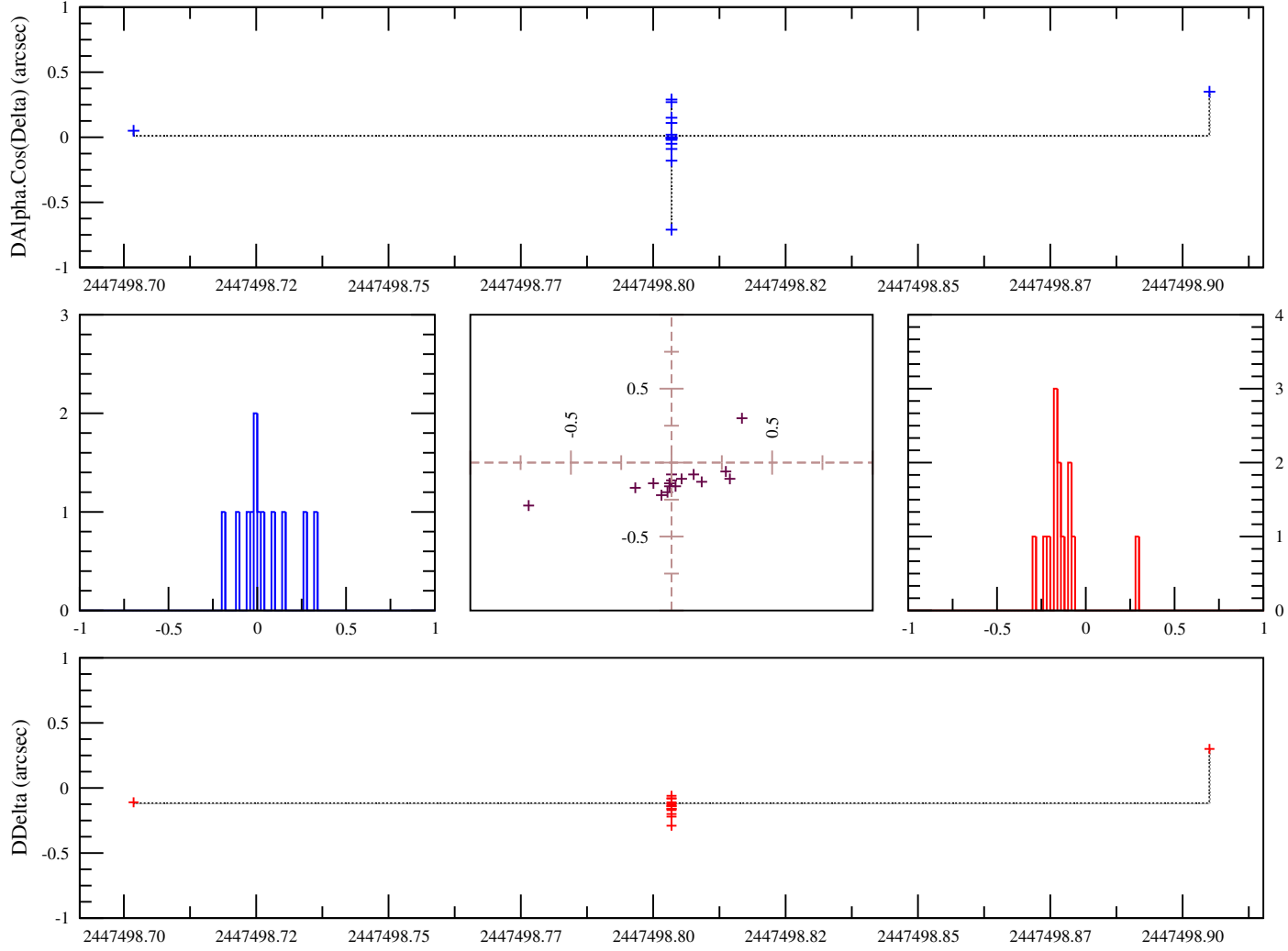


FIG. B.17: Observations Nicholson, 1991, Mt Palomar USA. OmC sur les observations d'Amalthée calculés avec l'éphéméride NJO2004A

Observations Nicholson, 1991, Mt Palomar [UAI=675] Satellite Amalthée - JPL Ephemeris

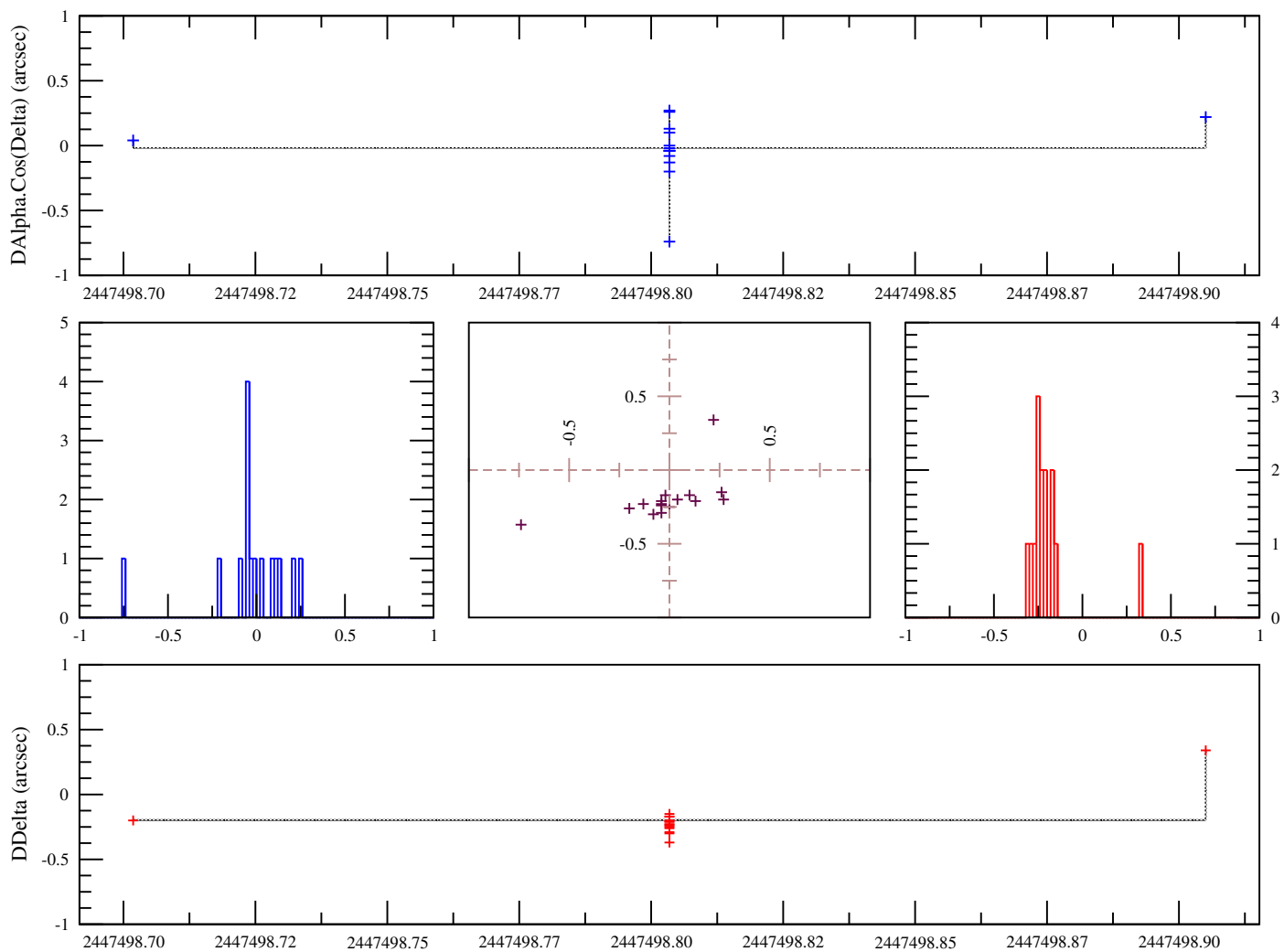


FIG. B.18: Observations Nicholson, 1991, Mt Palomar USA. OmC sur les observations d'Amalthée calculés avec l'éphéméride du JPL

Observations Flagstaff Novembre 2000, USNO-USA. [UAI=689]

Satellite Amalthée

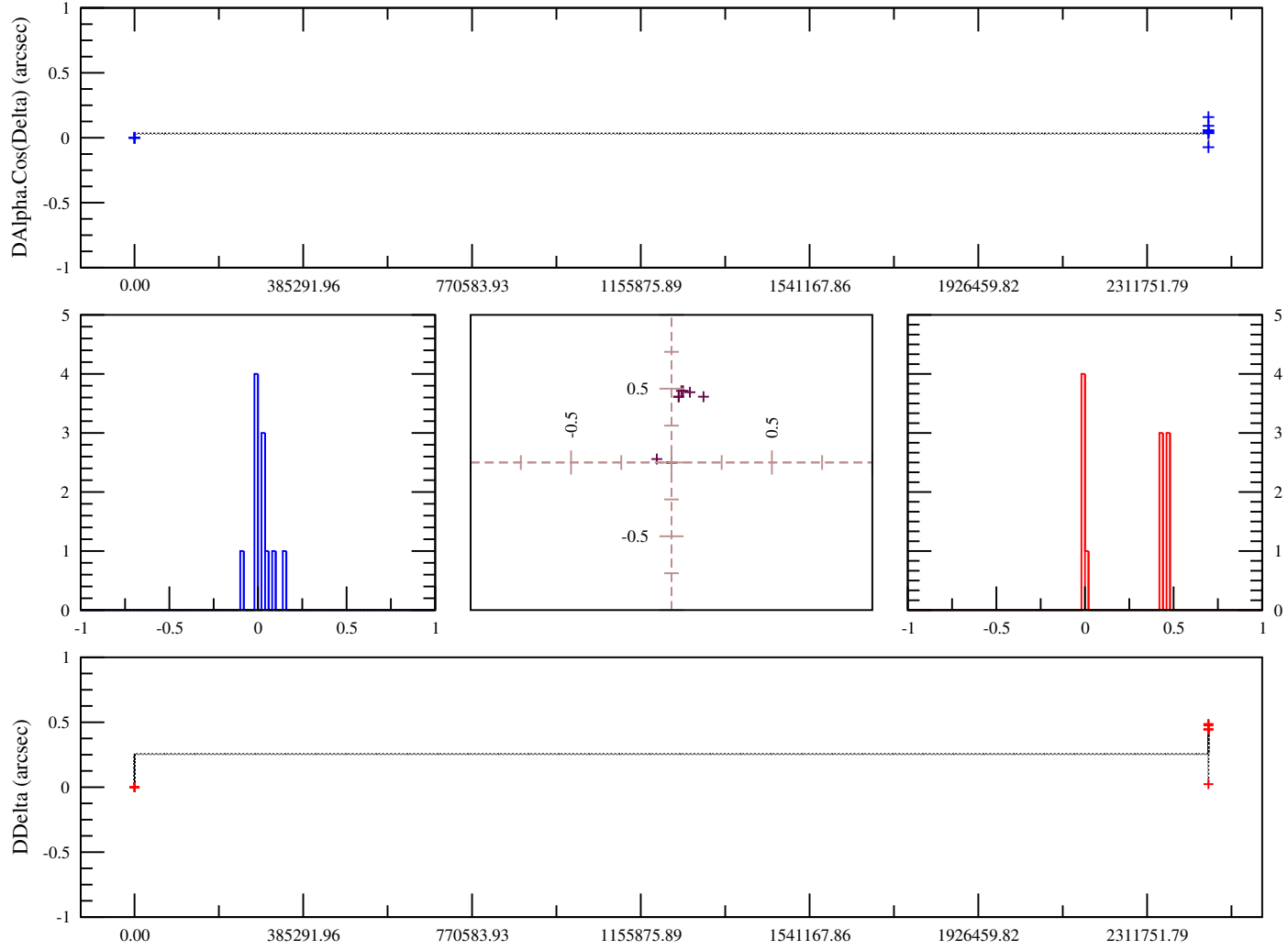


FIG. B.19: Observations Pascu D., Vachier F., 2000, USNO-Flagstaff, USA. OmC sur les observations d'Amalthée calculées avec l'éphéméride NJO2004A

Observations Flagstaff Novembre 2000, USNO-USA. [UAI=689]
 Satellite Amalthée - JPL Ephemeris

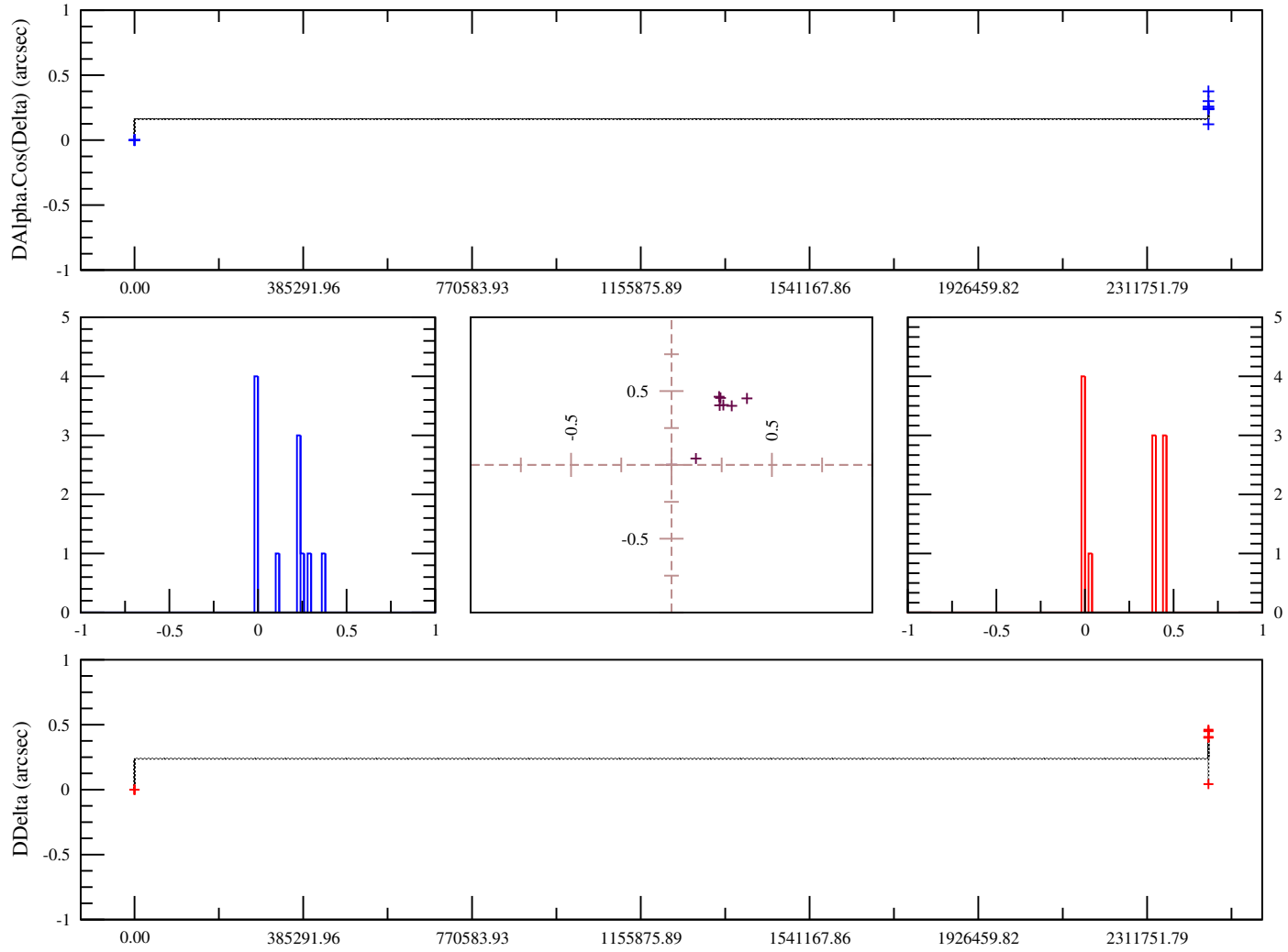


FIG. B.20: Observations Pasco D., Vachier F., 2000, USNO-Flagstaff, USA. OmC sur les observations d'Amalthée calculés avec l'éphéméride du JPL

Observations Pascu 1985, 1985, Flagstaff, USNO-USA. [UAI=689]

Satellite Amalthée

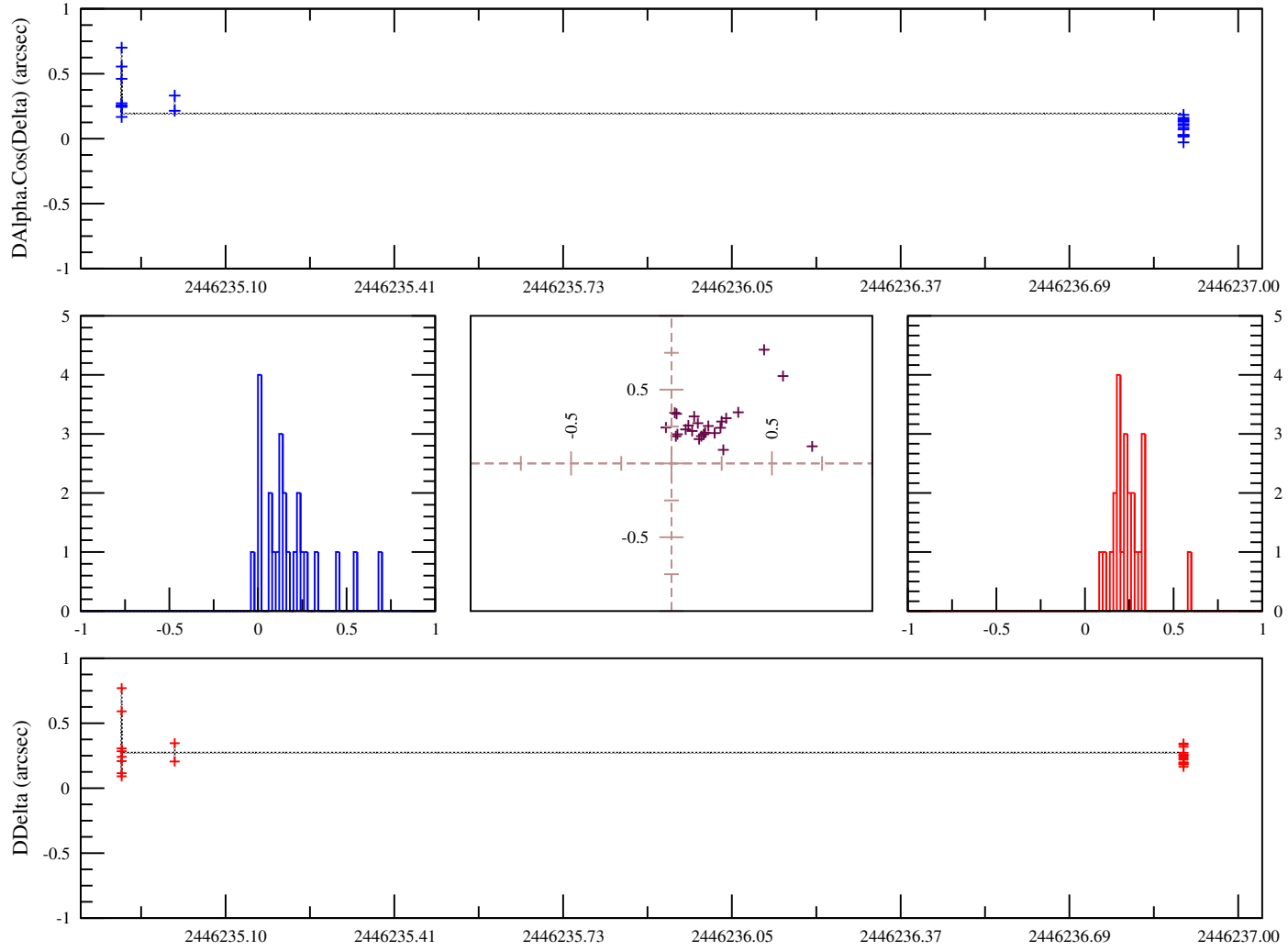


FIG. B.21: Observations Pascu D., 1985, USNO-Flagstaff, USA. OmC sur les observations d'Amalthée calculés avec l'éphéméride NJO2004A

Observations Pasco 1985, 1985, Flagstaff, USNO-USA. [UAI=689]
 Satellite Amalthee - JPL Ephemeris

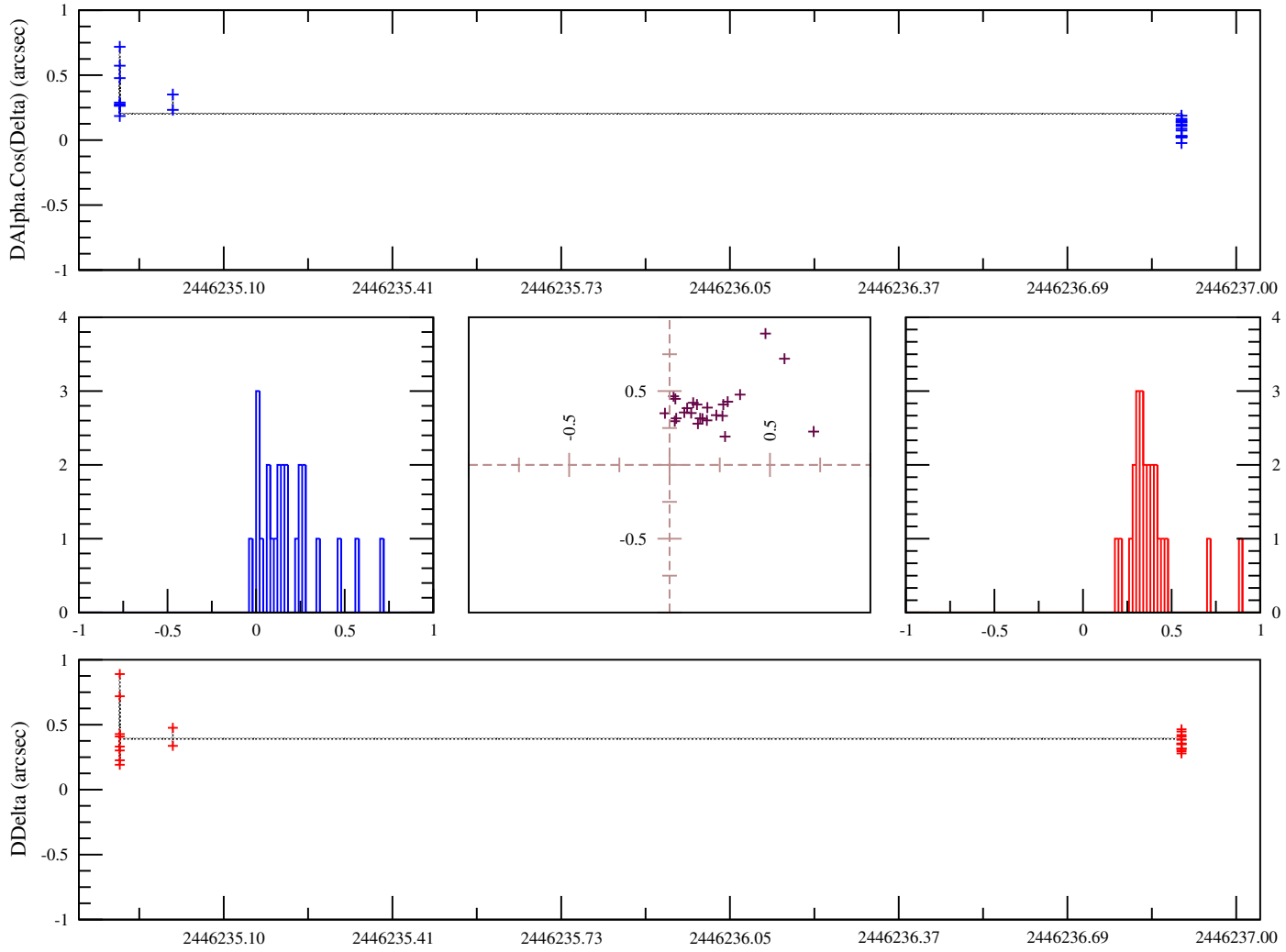


FIG. B.22: Observations Pasco D., 1985, USNO-Flagstaff, USA. OmC sur les observations d'Amalthee calculés avec l'éphéméride du JPL

Observations Ianna P. A., 1979, Leander McCormick, Charlottesville [UAI=780]

Satellite Amalthée

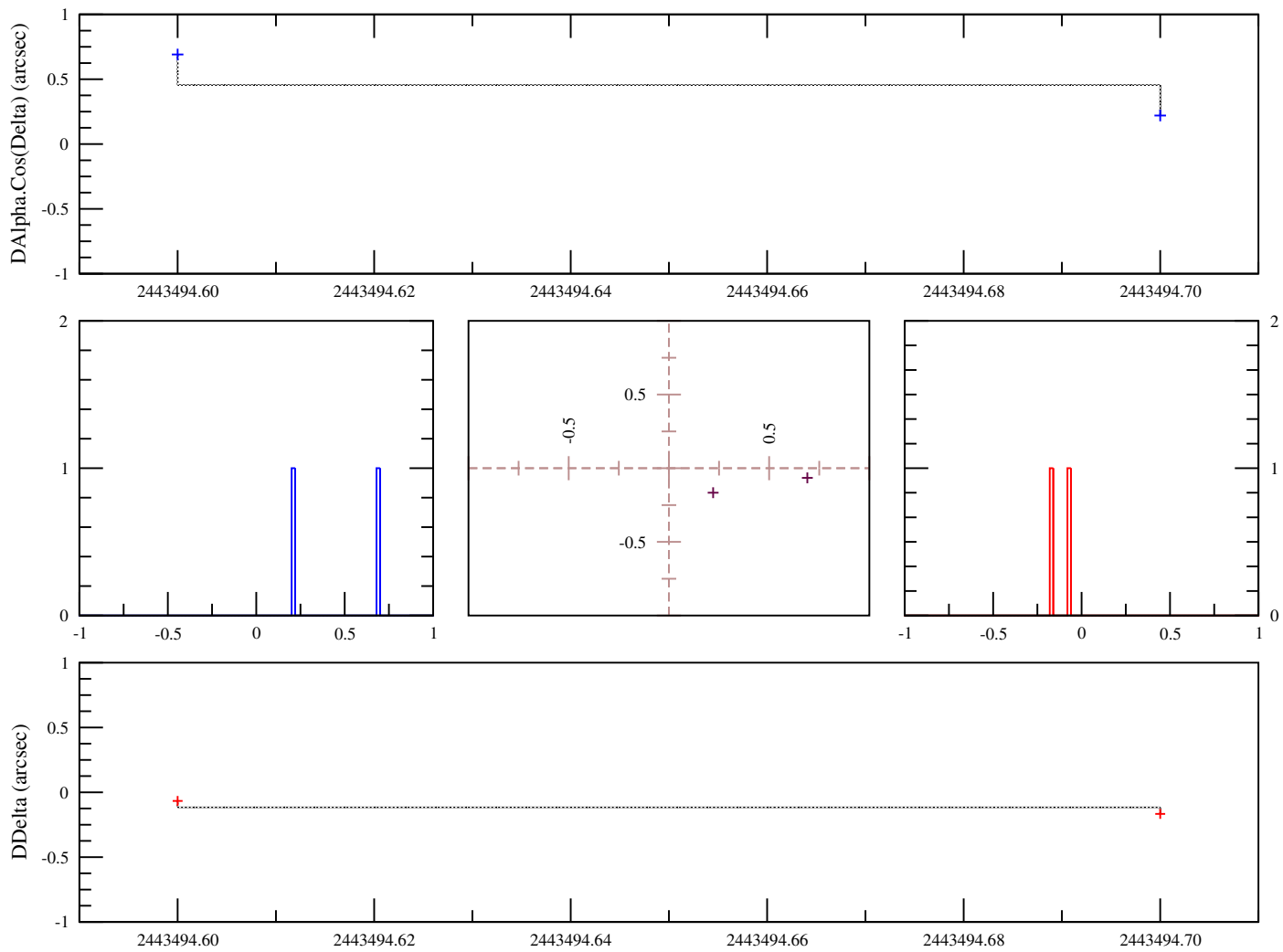


FIG. B.23: Observations Ianna P. A., 1979, Mc Cormick, USA. OmC sur les observations d'Amalthée calculés avec l'éphéméride NJO2004A

Observations Ianna P. A., 1979, Leander McCormick, Charlottesville [UAI=780]
 Satellite Amalthée - JPL Ephemeris

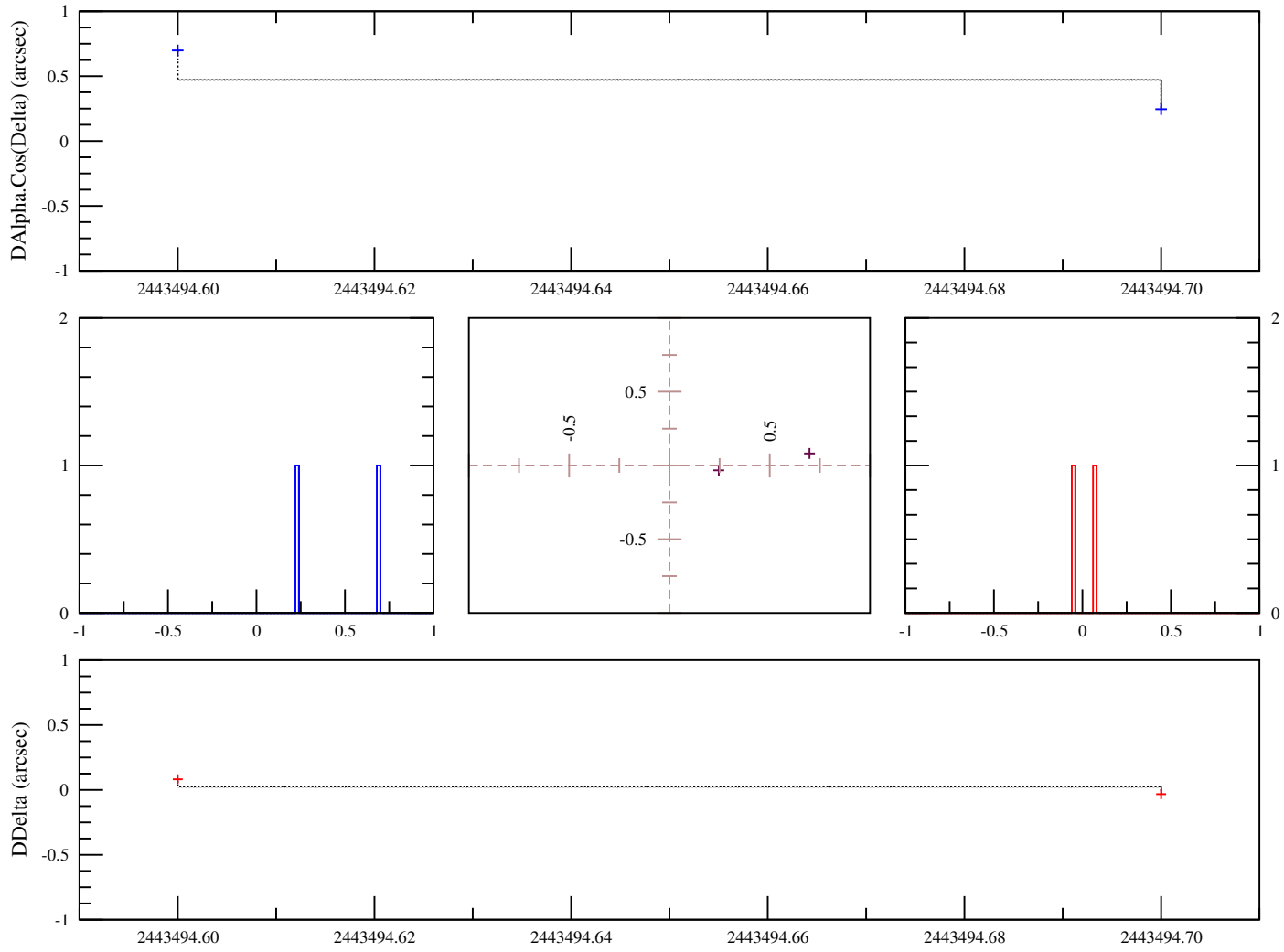


FIG. B.24: Observations Ianna P.A., 1979, Mc Cormick, USA. OmC sur les observations d'Amalthée calculés avec l'éphéméride du JPL

Observations Sudbury P.V., 1969, Kottomia [UAI=88]

Satellite Amalthée

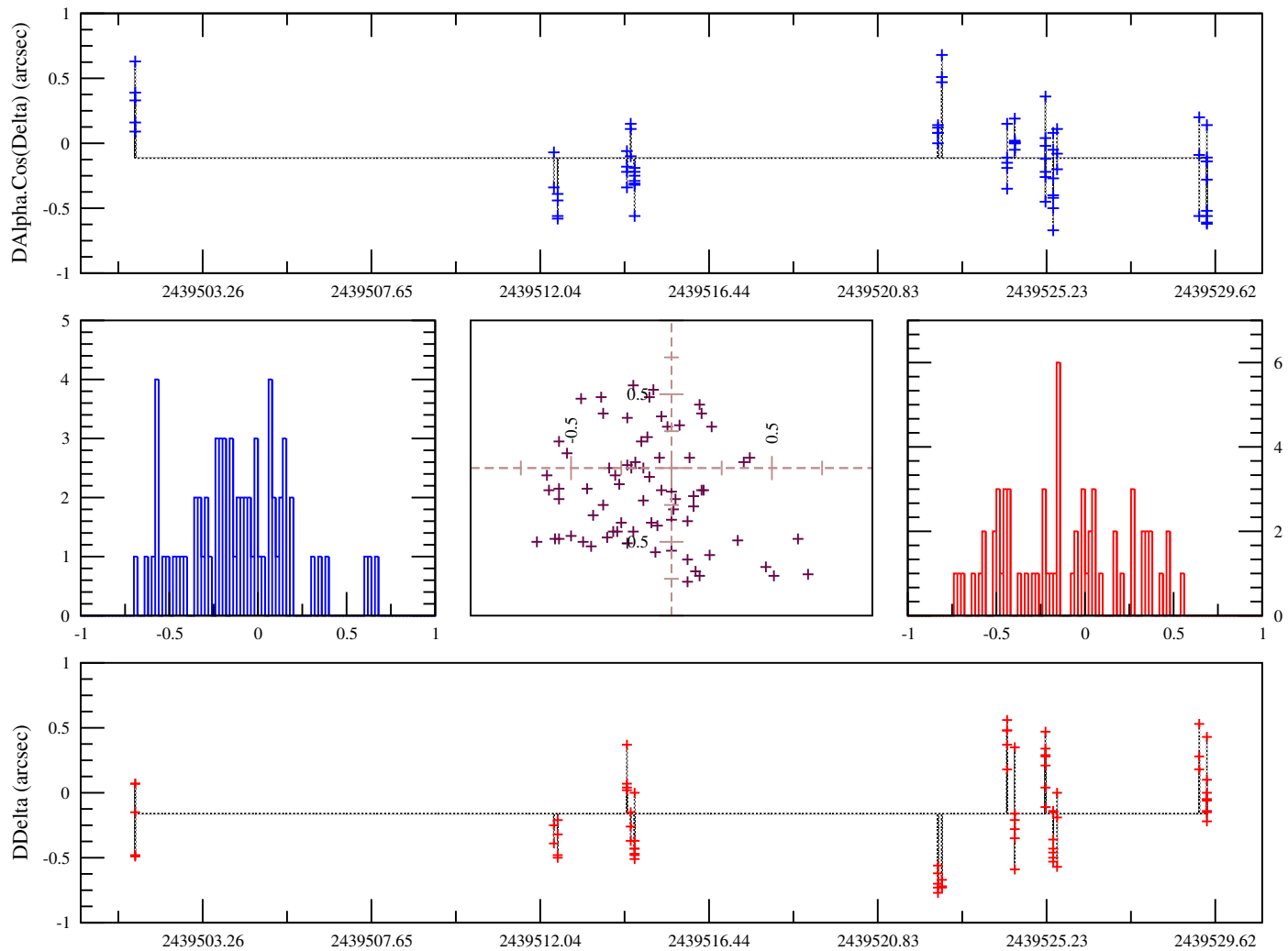


FIG. B.25: Observations Sudbury P.V., 1969, Obs. Kottomia, Egypte. OmC sur les observations d'Amalthée calculés avec l'éphéméride NJO2004A

Observations Sudbury P.V., 1969, Kottomia [UAI=88]
 Satellite Amalthée - JPL Ephemeris

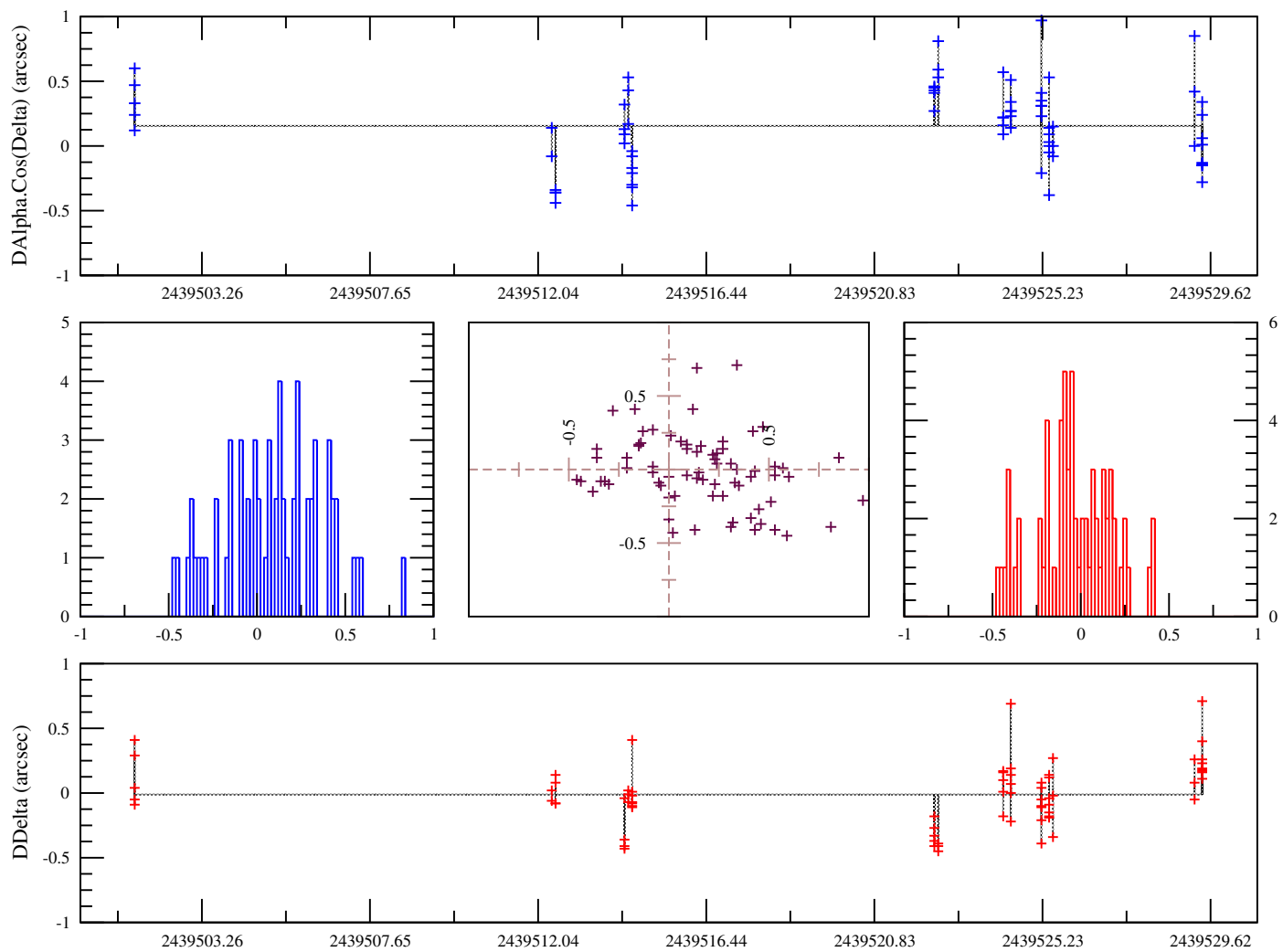


FIG. B.26: Observations Sudbury P.V., 1969, Obs. Kottomia, Egypte. OmC sur les observations d'Amalthée calculés avec l'éphéméride du JPL

Observations Mulholland, 1977, McDonald Observatory, Fort Davis [UAI=711]

Satellite Amalthée

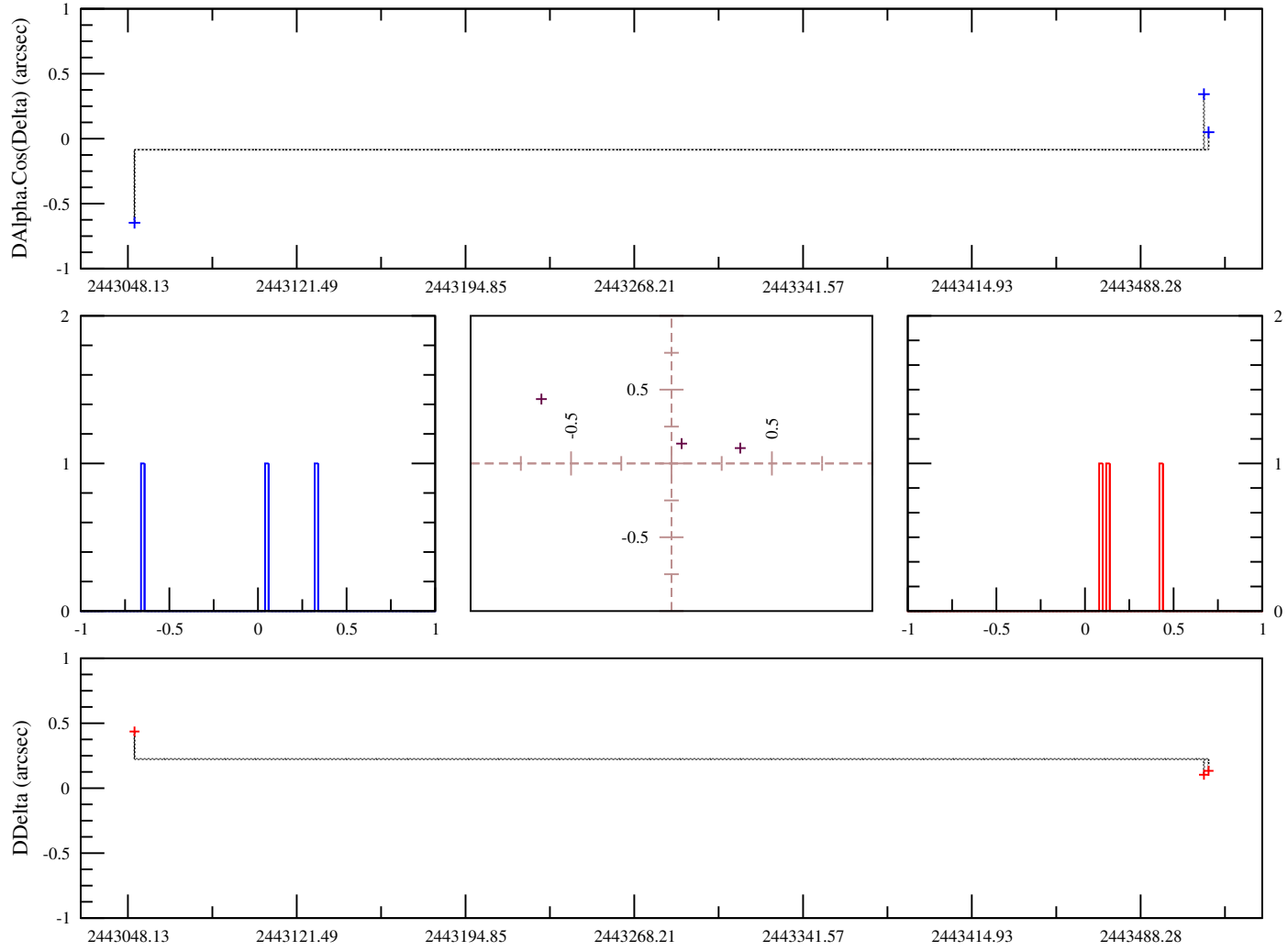


FIG. B.27: Observations Mulholland, 1977, Obs. McDonald, USA. OmC sur les observations d'Amalthee calculés avec l'éphéméride NJO2004A

Observations Mulholland, 1977, McDonald Observatory, Fort Davis [UAI=711]
 Satellite Amalthee - JPL Ephemeris

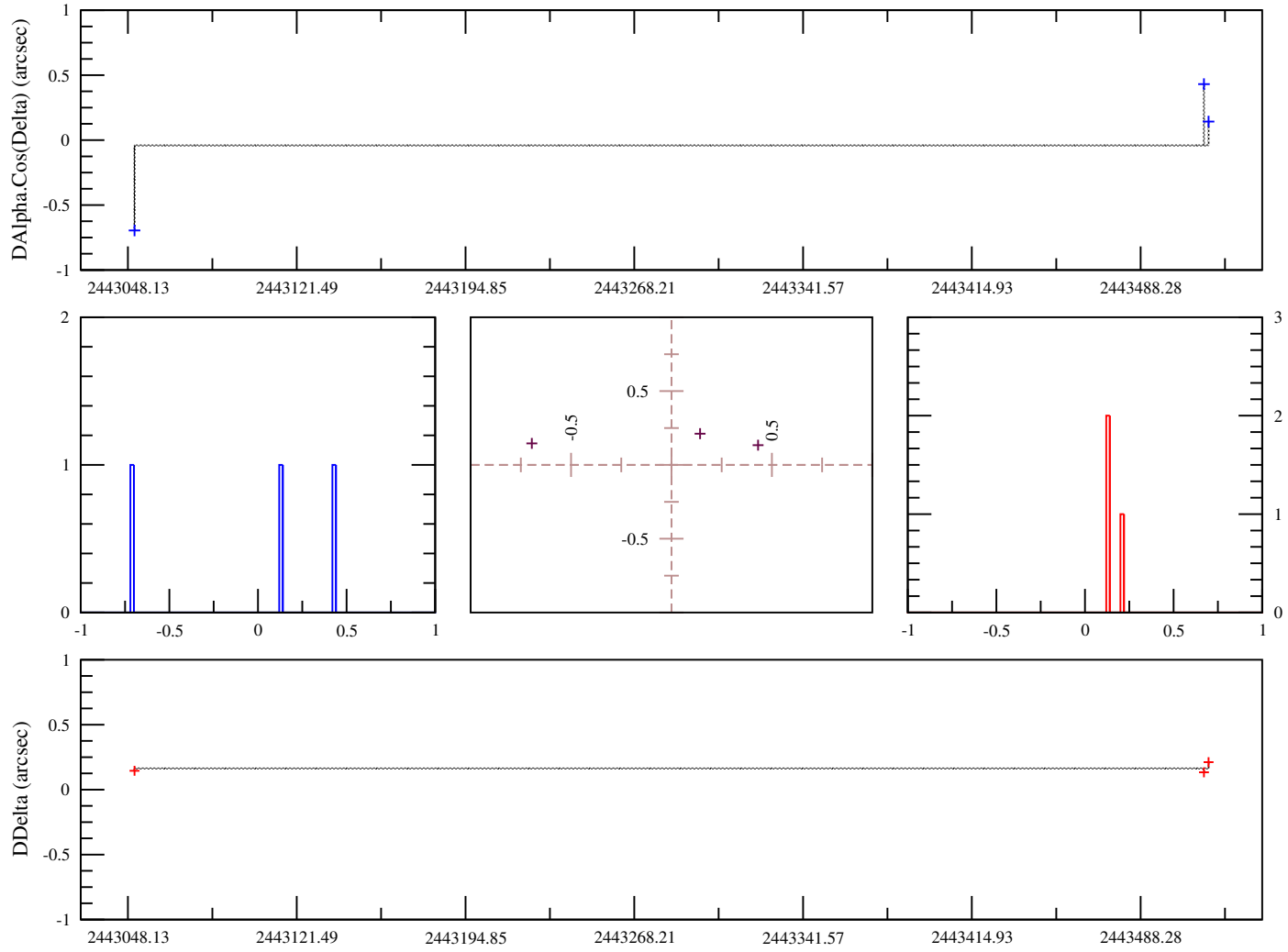


FIG. B.28: Observations Mulholland, 1977, Obs. McDonald, USA. OmC sur les observations d'Amalthee calculés avec l'éphéméride du JPL

Observations Kulyk-Ledovskaya, 1998-2000, Pik Terskol, Ukraine. [UAI=B18]

Satellite Amalthee

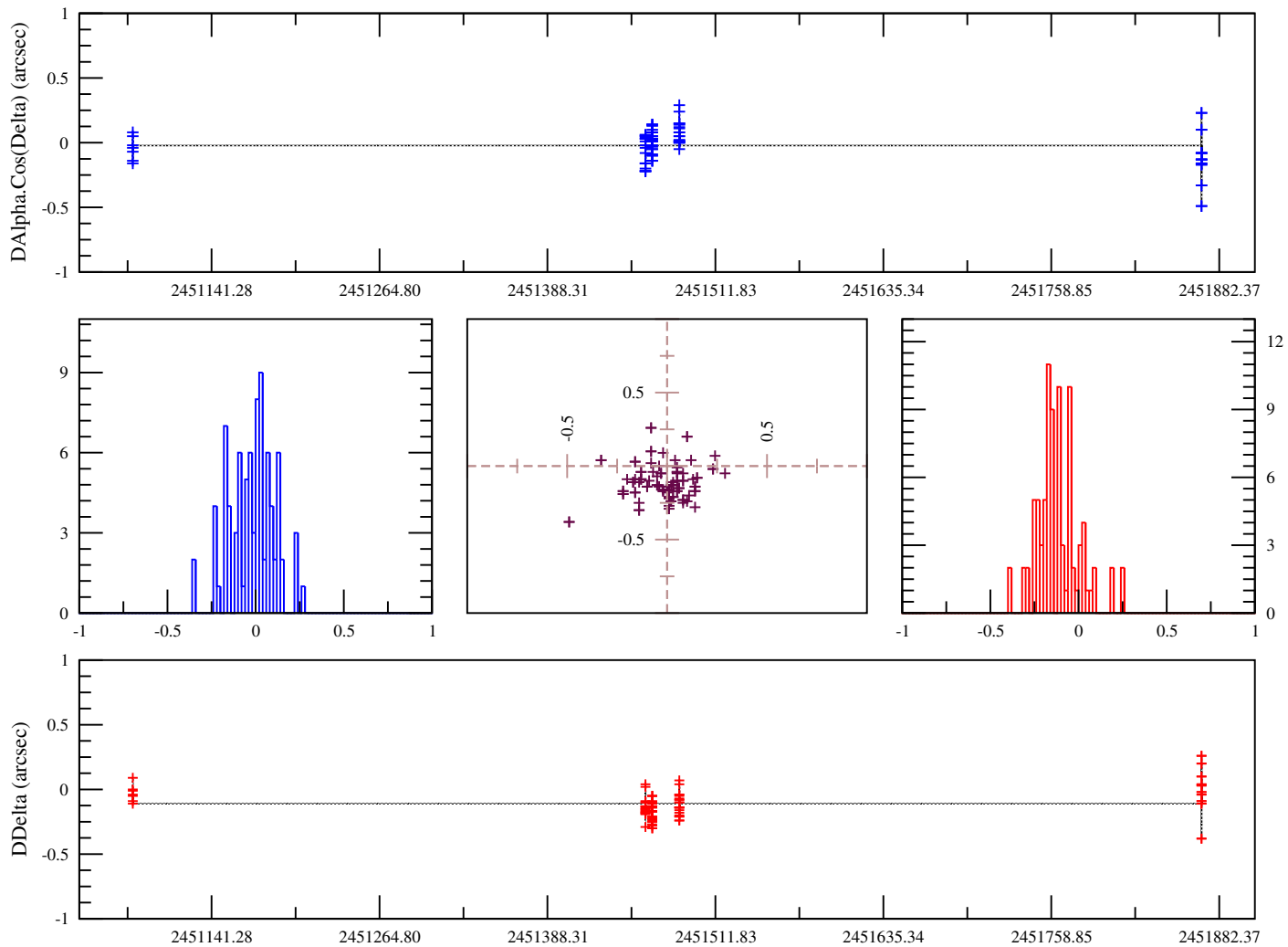


FIG. B.29: Observations Kulyk et al., 1998-2000, Pik Terskol, Ukraine. OmC sur les observations d'Amalthee calculées avec l'éphéméride NJO2004A

Observations Kulyk-Ledovskaya, 1998-2000, Pik Terskol, Ukraine. [UAI=B18]
 Satellite Amalthée - JPL Ephemeris

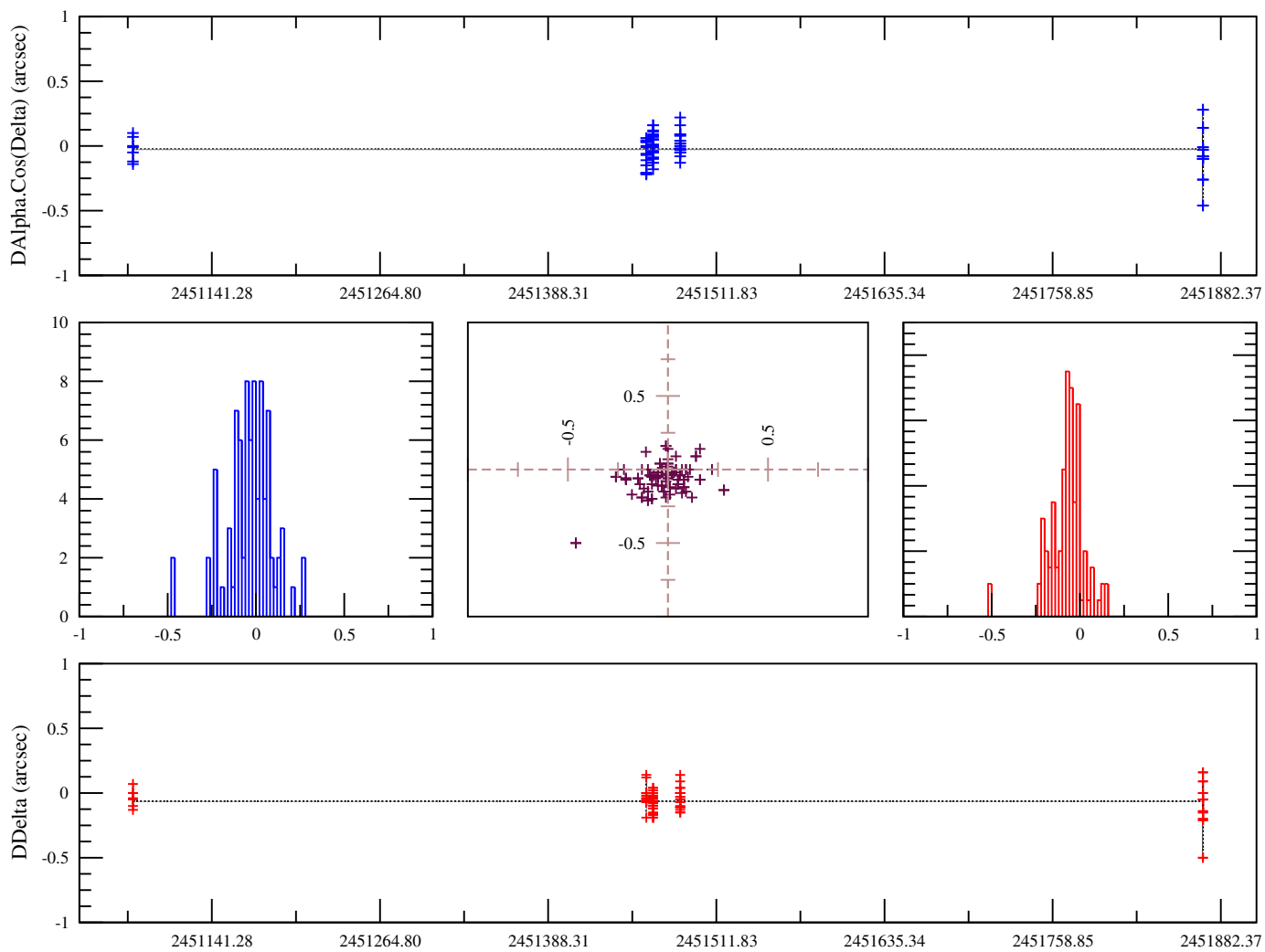


FIG. B.30: Observations Kulyk et al., 1998-2000, Pik Terskol, Ukraine. OmC sur les observations d'Amalthée calculés avec l'éphéméride du JPL

Annexe C

Publications

First dynamical model for the (22) Kalliope's satellite

Auteurs :

Vachier, F. ; Descamps, P. ; Berthier, J. ; Hestroffer, D. ; Marchis, F.

Affiliation :

IMCCE, UMR-CNRS, Obs. de Paris, France

UC, Berkeley

Journal :

American Astronomical Society, DPS meeting #35, #36.07

Date de publication :

12/2003

Résumé :

The existence of binary asteroid systems was proven very recently from the space (Belton et al., Icarus, 1995) and from the ground with Adaptive Optics and Radar Observations (Merline et al., Asteroid III, 2003). Through photometry, occultation observations, direct imaging (including Adaptive Optic and HST), radar methods and space probe, around 90 asteroids are suspected to be in fact a double system (see a list on http://www.imcce.fr/observateur/binast/binary_ast.php). Several questions about the stability of their orbit and their formation have been discussed and our group has been focusing on the moonlet system of 22 Kalliope.

We acquired 20 observations of the binary system between October 2001 and January 2003 using several Adaptive Optics systems (Lick, Palomar and VLT). We used the orbit characteristic derived by a geometrical model in Marchis et al., Icarus, 2003 as initial input. We used a dynamical model based on the 2-body problem perturbed by a zonal coefficient J_2 to fit these observations. As the primary mass and the J_2 are poorly known and as these parameters interact strongly in the model, it's difficult to find coherent results with all observations. Our first attempt is partially successful since we have fit in a coherent model the first 19 positions of Kalliope. We partially failed to predict the positions seen on the January 2003 images, even if the observed positions are located on the calculated orbit. We will give additional results considering several different masses and J_2 coefficients. We will show that is necessary to include additional physical processes to improve our model. And finally, additional observations (Margot and Brown, Science, 2003) may better constrain the density and distribution of mass of the primary to improve the model.

A three-dimensional solution for the orbit of the asteroidal satellite of 22 Kalliope

Auteurs :

Marchis, F. ; Descamps, P. ; Hestroffer, D. ; Berthier, J. ; Vachier, F. ; Boccaletti, A. ;
de Pater, I. ; Gavel, D.

Affiliation :

Astronomy Department, University of California, 601 Campbell Hall, 94720-3411,
Berkeley, CA, USA,

Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides, UMR-CNRS 8028,
Observatoire de Paris, 77, avenue Denfert-Rochereau, F-75014, Paris, France,
GPS-CalTech, 1200 E. California Blvd, M/S 150-21, 91125, Pasadena, CA, USA,
Astronomy Department, University of California, 94720-3411, Berkeley, CA, USA,
Lawrence Livermore National Laboratory/IGPP, 7000 East Avenue, 94551,
Livermore, CA, USA

Journal :

Icarus, Volume 165, Issue 1, p. 112-120.

Date de publication :

09/2003

Résumé

We carried out new observations of the binary asteroid 22 Kalliope (S2/2001) with the Shane 3-m telescope of the Lick observatory in October and November 2001. With a FWHM (full width at half maximum) of 0".2, Kalliope (apparent size of about 0".15) was not resolved but it was possible to separate the secondary from its primary whose apparent separation was of the order of 0".7 with a magnitude difference of 3.22 \pm 0.20. As each set of observations spanned a few days of time, they are well distributed along the secondary's orbit, enabling us to accurately estimate its orbit.

The satellite orbits 22 Kalliope in a prograde manner with respect to Kalliope's rotational spin (which is in a retrograde sense relative to its orbit around the Sun), on a highly inclined ($i=19.8\pm 2.0$ with respect to the equator of 22 Kalliope) and moderately eccentric orbit ($e=0.07\pm 0.02$) with an orbital period of 3.58 \pm 0.08 days. The semi-major axis is 1020 \pm 40 km. Using Kalliope's diameter as determined from IRAS data, the asteroid's bulk density is about 2.03 \pm 0.16 gcm⁻³, suggestive of a highly porous body with a porosity of 70% considering that the grain density of its meteoritic analog is of 7.4 gcm⁻³. This suggests a rubble pile, rather than solid, body. The measured nodal precession rate of the secondary's orbit seems to be much higher than expected from Kalliope's oblateness, assuming a homogeneous body (constant density). This suggests that Kalliope may be 60% more elongated or 35% larger than presently believed or/and that its internal structure is highly inhomogeneous with a denser outer shell.

Mutual phenomena involving J5 Amalthea in 2002-2003

Auteurs :

Vachier, F. ; Arlot, J. E. ; Thuillot, W.

Affiliation :

Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides, IMCCE-Observatoire de Paris vachier@bdl.fr

Journal :

Astronomy and Astrophysics, v.394, p.L19-L21 (2002)

Date de publication :

10/2002

Résumé

Every six years mutual eclipses and occultations occur among the Jovian system of satellites. Very accurate astrometric measurements and several physical characteristics of the surfaces can be inferred from their observation. This paper provides predictions of this type of events involving the fifth satellite J5 Amalthea, spanning from November 2002 to June 2003 and to urge astronomers to observe them. Only the predictions of the eclipses of Amalthea by Io are presented, when the distance between Amalthea-Io and Amalthea-Jupiter is large enough for photometric purposes. A full list of phenomena is available on the server http://www.imcce.fr/Phemu03/phemu03_eng.html

Bibliographie

- [1] I. Kulyk, K. Jockers, N. Karpov, and A. Sergeev. Astrometric CCD observations of the inner Jovian satellites in 1999-2000. AAP, 383 :724–728, February 2002.
- [2] P. D. Nicholson and K. Matthews. Near-infrared observations of the Jovian ring and small satellites. Icarus, 93 :331–346, October 1991.
- [3] url :<http://www.imcce.fr>.
- [4] R. A. Jacobson. The Gravity Field of the Jovian System and the Orbits of the Regular Jovian Satellites. AAS/Division for Planetary Sciences Meeting, 33 :0–+, November 2001.
- [5] J. K. Campbell and S. P. Synnott. Gravity field of the Jovian system from Pioneer and Voyager tracking data. AJ, 90 :364–372, February 1985.
- [6] R. A. Jacobson. The Orbits and Masses of the Galilean Satellites—Results from the Galileo Mission. Bulletin of the American Astronomical Society, 30 :1147–+, September 1998.
- [7] editor with 33 collaborating authors Burns, J.A. Planetary Satellite. The university of Arizona press, Tucson, Arizona, 1977.
- [8] M. W. Evans, C. C. Porco, and D. P. Hamilton. The Orbits of Metis and Adrastea : The Origin and Significance of their Inclinations. Bulletin of the American Astronomical Society, 34 :883–+, September 2002.
- [9] I. V. Ledovskaya, K. Jockers, N. V. Karpov, and A. V. Sergeev. Positions of Thebe and Amalthea (Ledovskaya+ 1999). VizieR On-line Data Catalog : J/other/KFNT/15.483. Originally published in : 1999KFNT...15..483L, 30 :1501–+, November 2001.
- [10] M. Iye and A. F. M. Moorwood, editors. Instrument Design and Performance for Optical Infrared Ground-based Telescopes, volume 4, mar 2003.
- [11] D. B. A. Monet, B. Canzian, C. Dahn, H. Guetter, H. Harris, A. Henden, S. Levine, C. Luginbuhl, A. K. B. Monet, A. Rhodes, B. Riepe, S. Sell, R. Stone, F. Vrba, and R. Walker. The USNO-A2.0 Catalogue (Monet+ 1998). VizieR Online Data Catalog, 1252 :0–+, October 1998.
- [12] A. Fienga and J. Berthier. Principe de réduction astrométrique. Notes Scientifiques et Techniques S063, Bureau des longitudes, à paraître.
- [13] W. Pence. Astronomical Data Analysis Software and Systems VIII. In ASP Conf., volume 172, page 487, 1999.
- [14] D. C. Jewitt, G. E. Danielson, and R. J. Terrile. Ground-based observations of the Jovian ring and inner satellites. Icarus, 48 :536–539, December 1981.
- [15] G. van Biesbroeck. Observations of Jupiter’s fifth satellite. AJ, 60 :275–+, August 1955.

- [16] P. V. Sudbury. The Motion of Jupiter's Fifth Satellite. Icarus, 10 :116–+, January 1969.
- [17] P. A. Ianna, P. Seitzer, and F. Levinson. Astrometric observations of the satellites of the outer planets. I - The Galilean satellites in 1977. Astronomical Journal, 84 :429–435, March 1979.
- [18] J. D. Mulholland, G. F. Benedict, and P. J. Shelus. Absolute and relative positions of Jupiter V /Amalthea/ and the Galilean satellites 1976-1978. AJ, 84 :668–670, May 1979.
- [19] S. Breiter. The theory of motion of JV Amalthea. I. Analytical solution. AAP, 314 :966–976, October 1996.
- [20] J. Berthier. Serveur d'éphémérides du bureau des longitudes. Librairie et programmes de calcul EPROC. Guide de l'utilisateur (v1.02). Notes Scientifiques et Techniques S062, Bureau des longitudes, 1998.
- [21] J. E. Arlot. New ephemerides for the Galilean Satellites of Jupiter calculated from Sampson-Lieske theory. In The Motion of Planets and Natural and Artificial Satellites, pages 185–196, 1983.
- [22] Press W.H. and al. Numerical Recipes. Cambridge University Press, 1986.
- [23] L. Anselmo and P. Farinella. Alfven drag for satellites orbiting in Jupiter's plasmasphere. Icarus, 58 :182–185, May 1984.
- [24] M. H. Acuna and N. F. Ness. The main magnetic field of Jupiter. Journal of Geophysical Research, 81 :2917–2922, June 1976.
- [25] R. Bulirsch and J. Stoer. Introduction to Numerical Analysis, Third Edition. Springer-Verlag, New York, 2002.
- [26] N. Emelianov. The construction of an analytical theory of artificial satellite motion with an accuracy up to third order with respect to the earth's oblateness. Astronomicheskii Zhurnal (ISSN 0004-6299), 63 :800–809, 1986.
- [27] F. Vachier, J. E. Arlot, and W. Thuillot. Mutual phenomena involving J5 Amalthea in 2002-2003. AAP, 394 :L19–L21, octobre 2002.
- [28] C. R. Chapman, J. Veverka, P. C. Thomas, K. Klaasen, M. J. S. Belton, A. Harch, A. McEwen, T. V. Johnson, P. Helfenstein, M. E. Davies, W. J. Merline, and T. Denk. Discovery and Physical Properties of Dactyl a Satellite of Asteroid 243 Ida. Nature, 374 :783–+, April 1995.
- [29] L. M. Close, W. J. Merline, D. Tholen, T. Owen, F. Roddier, and C. Dumas. Adaptive Optics Imaging of Pluto-Charon and the Discovery of a Moon around the Asteroid 45 Eugenia : The Potential of Adaptive Optics in Planetary Astronomy. AAS/Division for Planetary Sciences Meeting, 31 :0–+, December 1999.
- [30] J. L. Margot and M. E. Brown. Discovery and characterization of binary asteroids 22 Kalliope and 87 Sylvia. AAS/Division for Planetary Sciences Meeting, 33 :52.02, November 2001.
- [31] F. Marchis, P. Descamps, D. Hestroffer, J. Berthier, I. de Pater, and D. Gavel. Adaptive optics observations of the binary system (22) Kalliope : a three dimensional orbit solution. Acta Mathematica, pages 725–+, November 2002.
- [32] D. Pascu, S. P. Panossian, R. E. Schmidt, P. K. Seidelmann, and J. L. Hershey. B, V photometry of Thebe (JXIV). Icarus, 98 :38–42, July 1992.
- [33] D. Pascu, F. Colar, and J. R. Rohde. Astrometric CCD observations of Thebe(JXIV). BAAS, 24 :1059–+, June 1992.

- [34] D. Pascu, S. P. Panossian, R. E. Schmidt, P. K. Seidelmann, and J. L. Hershey. B, V Photometry of Thebe (JXIV). BAAS, 22 :1117–1117, June 1990.
- [35] D. Pascu. A Note on the Astrometric Precision of Minor Planet Observations. In IAU Colloq. 127 : Reference Systems, pages 327–+, 1991.
- [36] D. Pascu, J. L. Hersey, R. E. Schmidt, and P. K. Seidelmann. CCD B, V Photometry of Inner, Faint, Planetary Satellites. BAAS, 19 :1124–+, September 1987.
- [37] D. Pascu, P. K. Seidelmann, R. E. Schmidt, E. J. Santoro, and J. L. Hershey. Systematic Effects in the Astrometric Observations of Miranda. BAAS, 18 :837–+, June 1986.
- [38] A. Proctor, D. Hamilton, and K. Rauch. An Explanation for the High Inclinations of Amalthea and Thebe. In American Physical Society, April Meeting, Jointly Sponsored with the High Energy Astrophysics Division (HEAD) of the American Astronomical Society April 20 - 23, 2002 Albuquerque Convention Center Albuquerque, New Mexico Meeting ID : APR02, abstract #B17.077, pages 17077–+, April 2002.
- [39] D. P. Simonelli, L. Rossier, P. C. Thomas, J. Veverka, J. A. Burns, and M. J. S. Belton. Leading/Trailing Albedo Asymmetries of Thebe, Amalthea, and Metis. Icarus, 147 :353–365, October 2000.
- [40] P. C. Thomas, J. A. Burns, L. Rossier, D. Simonelli, J. Veverka, C. R. Chapman, K. Klaasen, T. V. Johnson, and M. J. S. Belton. The Small Inner Satellites of Jupiter. Icarus, 135 :360–371, September 1998.
- [41] D. C. Jewitt and G. E. Danielson. The Jovian ring. Journal of Geophysical Research, 86 :8691–8697, September 1981.
- [42] D. C. Jewitt, G. E. Danielson, and S. P. Synnott. Discovery of a new Jupiter satellite. Science, 206 :951–+, November 1979.
- [43] S.P. Synnott. Orbits of the Small Inner Satellites of Jupiter. Icarus, 58, 1984.
- [44] S.P. Synnott. 1979J2 : Discovery of a Previously Unknown Jovian Satellite. Science, 210, 1980.
- [45] J.P. Drossard et J.P. Maillard. Les aurores polaires de Jupiter. la Recherche, 240, février 1992.
- [46] P. Masson et A. Brahic. Les satellites de Jupiter et saturne. La Recherche, 120, mars 1981.
- [47] J. A. Burns, M. R. Showalter, D. P. Hamilton, P. D. Nicholson, I. de Pater, M. E. Ockert-Bell, and P. C. Thomas. The Formation of Jupiter’s Faint Rings. Science, 284 :1146–+, May 1999.
- [48] D. P. Hamilton. Jupiter’s Gossamer Rings Explained. AAS/Division for Planetary Sciences Meeting, 35 :-+, May 2003.
- [49] F. Marchis, P. Descamps, D. Hestroffer, J. Berthier, I. de Pater, and D. Gavel. Adaptive optics observations of the binary system (22) Kalliope : a three dimensional orbit solution. In ESA SP-500 : Asteroids, Comets, and Meteors : ACM 2002, pages 725–+, November 2002.
- [50] J. Berthier. Serveur d’éphémérides du bureau des longitudes. Définitions relatives aux éphémérides de position des corps célestes. Notes Scientifiques et Techniques S060, Bureau des longitudes, 1998.
- [51] J. Berthier. Serveur d’éphémérides du bureau des longitudes. Définitions relatives aux éphémérides pour l’observation physique des corps du système solaire. Notes Scientifiques et Techniques S061, Bureau des longitudes, 1998.

- [52] F. Marchis, P. Descamps, D. Hestroffer, J. Berthier, F. Vachier, A. Boccaletti, I. de Pater, and D. Gavel. A three-dimensional solution for the orbit of the asteroidal satellite of 22 Kalliope. Icarus, 165 :112–120, September 2003.
- [53] F. Vachier, P. Descamps, J. Berthier, D. Hestroffer, and F. Marchis. First dynamical model for the (22) Kalliope’s satellite. AAS/Division for Planetary Sciences Meeting, 35 :-+, December 2003.