

Rapport de stage en laboratoire
- Master 2 Planétologie -

Analyses des occultations stellaires
du 8 Janvier 2013 par Varuna
et du 3 Juin 2013 par Chariklo

LIGIER Nicolas
Observatoire Paris-Meudon
Laboratoire LESIA

Université Paris Sud XI, Orsay, FRANCE
nicolas.ligier@laposte.net

20 juin 2013

Table des matières

1	Introduction	5
2	Classification des TNOs	7
2.1	Les objets de la ceinture principale de Kuiper	7
2.1.1	Les «résonnants»	7
2.1.2	Les Cubewanos	7
2.2	Les SDOs (Scattering Disk Objects)	8
2.3	Les DOs (Detached Objects)	8
2.4	Les objets du nuage de Oort	8
3	Occultations stellaires et autres moyens d'études des TNOs	9
3.1	Les méthodes «communes»	9
3.1.1	Période de rotation et forme	9
3.1.2	Composition chimique de surface	10
3.1.3	Taille	10
3.2	La méthode des occultations stellaires	11
4	Méthodologie d'acquisition des données d'occultations	12
4.1	Prédiction d'une occultation	12
4.1.1	Catalogue et astrométrie stellaire	13
4.1.2	Ephémérides et offset orbitaux	13
4.2	Sélection et campagne d'observations	15
4.2.1	Sélection des occultations	15
4.2.2	Campagne d'observations	15
4.3	Observation et réduction des données	16
4.3.1	Matériel d'observation	16
4.3.2	Réduction des données	17
5	Mise en contexte du stage	20
5.1	Généralités sur Varuna	20
5.1.1	Généralités et propriétés orbitales	20
5.1.2	Nature de la surface	20
5.1.3	Forme de Varuna	20
5.2	Ancienne occultation : 19 Février 2010	22
5.3	Objectif du stage	23
6	Varuna : l'événement du 08/01/2013	24
6.1	Astrométrie et prévision	24
6.2	Observation et instruments	25
6.3	Résultats	26
6.3.1	Mesure de l'offset du photocentre	26
6.3.2	Détermination des temps d'immersion et d'emersion	28

6.4	Résultat global, discussions et perspectives	30
7	Chariklo (Centaure)	32
7.1	Généralités	32
7.2	L'occultation	33
7.2.1	Astrométrie et prévision	33
7.2.2	Observation et instruments	34
7.3	Les résultats	35
7.3.1	Des événements «secondaires»...	35
7.3.2	Détermination de T_{imm} et T_{eme}	36
7.4	Résultat général, déductions et discussions	37
7.4.1	Forme et dimension	37
7.4.2	Un anneau ?	38
8	Conclusion	41

Abstract

On the borders of our solar system, beyond the orbit of Neptune, are small icy bodies commonly called Trans-Neptunian Objects (TNOs). Since the discovery of the first TNO ever found in the solar system, 1992QB1, nearly 1300 TNOs were discovered. These bodies, which are not considered as planets for not having «cleaned» their orbits, are relics of the primordial solar system. Indeed, because of their great distance from the Sun, these bodies are probably still in almost primitive condition. Thus, informations on their distribution, on their dynamics and also on their chemical composition would be likely to provide us some precious informations about the formation and evolution of our solar system.

Because of the great distance separating us from these objects, a very effective method in order to study these small bodies is known as stellar occultation method. It consists in observing the transit of a TNO in front of a star, in the manner of a solar eclipse in which the TNO acts as the Moon and the Sun as the distant star. The correlated study of the duration of the same event observed in different places on Earth allows us to determine the TNO's dimensions very accurately, and then to deduce precise values of albedo and to speculate about the chemical composition on the surface of it. To these informations is added the one about the presence or not of an atmosphere, deduced from the study of the shape of the light curve during the event.

Globally, this internship report presents (1) the different types of TNOs, (2) the stellar occultation's method, (3) the necessary preliminary studies in order to predict and acquire datas of such event, (4) the results obtained after treatment and analysis of two stellar occultations by Varuna (8 January 2013) and Chariklo (3 June 2013). We give here some preliminary results on (a) the shape and the dimensions of Varuna, (b) the shape and the dimensions of Chariklo, and (c) the discovery of a ring around the last one.

Résumé

Aux confins de notre système solaire, au-delà de l'orbite de Neptune, se trouvent des petits corps glacés communément appelés Objets Trans-Neptuniens (TNOs). Depuis la découverte de 1992QB1, premier TNO avéré du système solaire, pas moins de 1300 TNOs ont été découverts.

Ces corps, qui ne sont pas considérés comme des planètes car n'ayant pas fait le «ménage» sur leur orbite, sont des reliques du système solaire primordial. En effet, du fait de leur grand éloignement au Soleil, ces corps sont sans doute restés dans un état quasi primitif. Ainsi, des renseignements sur leur distribution, sur leur dynamique et sur leur composition chimique seraient susceptibles de nous apprendre beaucoup d'informations précieuses sur la formation et l'évolution de notre système solaire.

Au vu de la très grande distance nous séparant de ces objets, une méthode très efficace pour l'étude de ces petits corps est la méthode dite de l'occultation stellaire. Celle-ci consiste en l'observation du passage d'un TNO devant une étoile, un peu à la manière d'une éclipse du Soleil par la Lune, le TNO jouant donc le rôle de la Lune et l'étoile lointaine celui du Soleil.

Le recoupement des durées d'occultation observées en différents endroits sur Terre nous permet avant tout de remonter aux dimensions du TNO de manière très précise, pour ensuite en déduire des valeurs précises de l'albédo et de pouvoir émettre des hypothèses quant à la composition chimique à la surface du TNO. À ces informations s'ajoute celle sur la présence ou non d'une atmosphère, déduite grâce à l'étude de l'allure de la courbe lumineuse au moment de l'événement.

Ce rapport de stage présente (1) les différentes classes de TNOs, (2) la méthode des occultations stellaires, (3) les études préalables qui sont nécessaires afin de prédire et d'acquérir des données suite à un tel événement, (4) les résultats obtenus suite au traitement et à l'analyse des données d'occultations stellaires par Varuna (8 janvier 2013) et Chariklo (3 juin 2013).

Nous donnons des résultats préliminaires sur (a) la taille et la forme de Varuna, (b) la taille et la forme de Chariklo, (c) la découverte d'un anneau autour de ce dernier.

Chapitre 1

Introduction

Par définition, les TNOs correspondent à tous les corps appartenant à notre système solaire et possédant une orbite allant au-delà de celle de Neptune, la dernière planète du système solaire. Les premiers résultats concernant leur taille et leur masse, couplés à leur très grande distance au Soleil (supérieure à 30 Unités Astronomiques), ont abouti au fait que les TNOs sont des corps telluriques de relativement petite taille et composés d'un mélange de glaces et de roches.

Bien que l'existence de tels objets fut proposée dès le milieu du siècle dernier (notamment par Gerald Kuiper), il fallut attendre 1992 pour découvrir le premier TNO : 1992QB1 (Jewitt and Luu 1993). Dès lors, plus de 1260 TNOs ont été découverts, et cette découverte massive de TNOs a notamment abouti à la reconsidération du «statut» de planète pour Pluton en 2006, certains TNOs étant alors mesurés avec une taille similaire voire supérieure à celle de Pluton (M.E. Brown et al., 2005). C'est ainsi qu'en août 2006 l'Union Astronomique Internationale classa Pluton comme étant un corps appartenant à la grande famille des TNOs.

Du fait de leur très grand éloignement et de leur découverte plutôt récente, ces objets n'ont encore jamais été visités (la mission NASA *New Horizons* arrivera à destination de Pluton en Juillet 2015) et sont donc encore très mal connus. Toutefois, différentes théories de formation des TNOs ont quand même été élaborées. Aussi, à ce jour, le modèle le plus convaincant concernant l'évolution du système solaire, communément appelé «modèle de Nice», prévoit que ces objets se sont formés plus près du Soleil qu'ils ne le sont aujourd'hui, et qu'ils auraient été «déplacés» au niveau de leur position actuelle suite aux perturbations gravitationnelles engendrées par la migration des planètes géantes (Gomes et al. 2005). Afin de mieux contraindre leur mode de formation et leur évolution, l'étude systématique de leurs propriétés ainsi que des processus chimiques et thermiques qui y ont eu lieu paraît nécessaire.

De nos jours, la technique la plus puissante pour l'étude de ces corps est la technique des occultations stellaires. Cette technique consiste à observer un TNO lors de son transit devant une étoile depuis différents endroits sur Terre. Le recoupement des données obtenues par ces différents observatoires va nous permettre de déterminer les dimensions et la forme de ce corps avec une très grande précision.

Mon stage a eu lieu à l'Observatoire Paris Meudon dans le pôle Planétologie du LESIA (Laboratoire d'Etudes Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique) sous la direction de Mr Bruno Sicardy. Il porte sur le traitement et l'analyse de données obtenues suite à deux occultations : l'une par le gros TNO Varuna (8 Janvier 2013), et l'autre par le Centaure Chariklo (3 Juin 2013). Le but de mon stage a donc été de mieux contraindre les dimensions et les formes de Varuna et Chariklo. Nous avons d'autre part détecté un anneau autour de Chariklo, dont nous donnerons quelques propriétés préliminaires.

Après avoir rapidement introduit une classification des différents TNOs existants, nous aborderons les moyens à notre disposition pour l'étude des TNOs en mettant particulièrement l'accent sur la méthode des occultations stellaires. Puis, nous développerons la méthodologie et les démarches nécessaires à l'acquisition de ces données d'occultations. Ensuite, nous replacerons mon stage dans son contexte avant d'expliquer l'objectif de mon stage. Enfin, nous exposerons les résultats obtenus et nous conclurons par une discussion sur ceux-ci avant d'évoquer quelques perspectives possibles à mon stage.

Chapitre 2

Classification des TNOs

Depuis la découverte de 1992QB1, 1260 TNOs ont été découverts. Leur étude a permis de faire une classification dynamique de ces objets, notamment en fonction de leur distance au soleil et de leurs paramètres orbitaux (Gladman et al. 2008). Chaque TNO appartient à un des groupes suivants (Figure 2.1) :

2.1 Les objets de la ceinture principale de Kuiper

Une large majorité de ces objets font partie de la ceinture de Kuiper qui s'étend de 30 UA jusqu'à environ 55 UA (Stern et al. 1997). Ces objets se répartissent en deux sous-groupes :

2.1.1 Les «résonnants»

Les objets résonnants sont ceux dont l'orbite est en résonance avec Neptune, comme par exemple avec une résonance 1 :2, 2 :3, 2 :5 etc etc... Les effets de cette résonance avec Neptune sont notamment visibles à travers l'excentricité et l'inclinaison qui sont élevées pour ces corps. Pluton fait parti de cette catégorie là avec notamment une résonance 2 :3 ; c'est pourquoi, en référence à Pluton, tous les corps avec une résonance 2 :3 sont appelés Plutinos.

2.1.2 Les Cubewanos

Les Cubewanos ont été nommés ainsi en référence à 1992QB1 qui est le premier représentant de cette classe de TNO. L'orbite de ces objets un peu plus «classiques» n'est pas contrôlée par l'influence gravitationnelle de Neptune, et possèdent donc une orbite plutôt circulaire. Toutefois, bien que circulaire, l'orbite de ces objets peut être inclinée de manière plus ou moins significative, ce qui a amené à subdiviser cette catégorie en deux : une population "chaude" ($i > 4,5^\circ$) et une population "froide" ($i < 4,5^\circ$) (Trujillo et al. 2001 ; Brown 2001). Pour l'instant, une corrélation entre la couleur et l'inclinaison des objets semblent exister (Doressoundiram et al. 2002 ; Gulbis et al. 2006), mais une telle division demande à être vérifiée par une nouvelle étude. Varuna et Makemake (découverts en 2003 et 2005) sont les Cubewanos les plus connus.

2.2 Les SDOs (Scattering Disk Objects)

Ce sont des objets qui, contrairement aux objets de la catégorie précédente, ont des orbites qui ne sont pas stables, c'est à dire dont la valeur du demi-grand axe (a) peut varier de manière significative sur des périodes relativement courtes ($\Delta a > 1,5$ UA sur 10^7 ans). Ces objets ont globalement une valeur de $a > 50$ UA, mais de tels objets peuvent aussi exister à partir d'une valeur de a égale à 30 UA.

2.3 Les DOs (Detached Objects)

Ce sont des objets qui sont souvent associées à la famille des SDOs (dans la littérature, on peut parfois en parler sous le nom de Extended-SDOs), la limite entre les deux familles étant assez fine. Toutefois, selon Gladman (2008), on peut différencier les DOs des SDOs si les deux critères ci-dessous sont vérifiés :

1. La distance au Soleil des DOs au moment de leur périhélie est suffisamment grande (au-delà de la résonance 2 :1 avec Neptune) pour que ces objets ne soient pas affectés par l'influence gravitationnelle de Neptune.
2. Les DOs ont une valeur d'excentricité $e > 0,24$ (valeur arbitraire).

Les membres les plus connus de cette catégorie d'objets sont Sedna et Eris (découverts en 2003), Eris étant un TNO possédant des dimensions semblables à celles de Pluton (Sicardy et al. 2011).

2.4 Les objets du nuage de Oort

Les objets du nuage de Oort sont des objets se situant à une distance $a > 2000$ UA, distance à laquelle la dynamique des corps semble alors devenir dépendante des influences externes au système solaire (Dones et al. 2004).

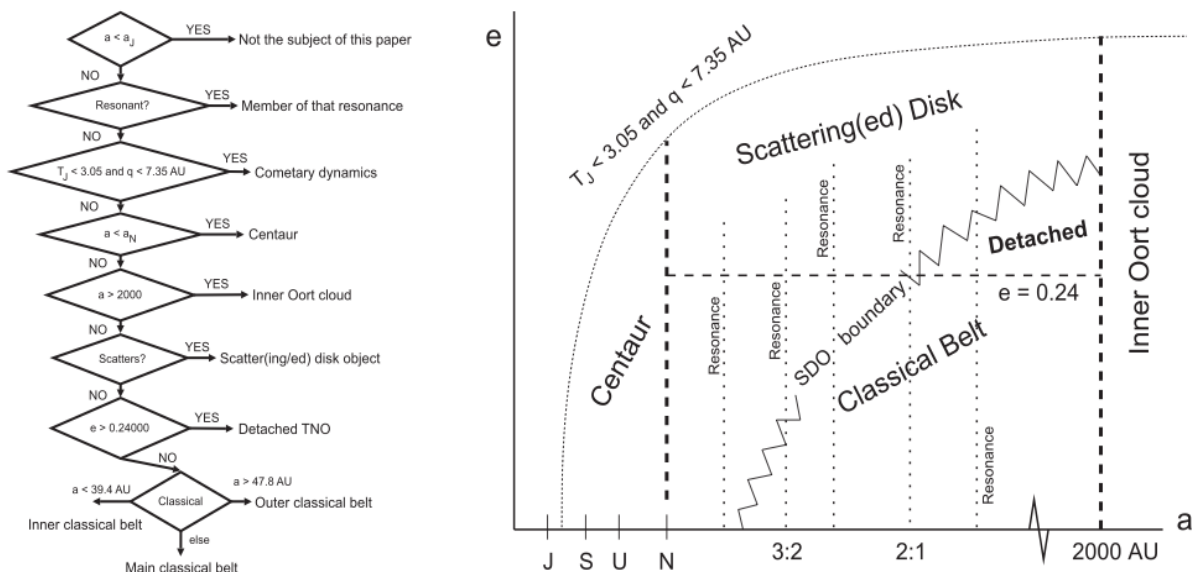


FIGURE 2.1 – À gauche : l'algorithme permettant la classification de chaque TNO. À droite : Représentation graphique (pas à l'échelle) des zones des différents types de TNOs. La «SDO boundary» n'est pas parfaitement définie car elle est variée légèrement selon les résultats des modélisations numériques.

Chapitre 3

Occultations stellaires et autres moyens d'études des TNOs

3.1 Les méthodes «communes»

À l'heure qu'il est, aucune mission n'a jamais eu l'occasion d'aller explorer in-situ un TNO. Une telle mission est cependant en cours, *New Horizons*, dont l'objectif principal est le survol du système Pluton-Charon en juillet 2015. Après avoir visité ce système, la mission aura pour objectif d'aller explorer d'autres TNOs présents dans la ceinture de Kuiper. *New Horizons* devrait accumuler les données sur différents TNOs jusqu'en 2025, date à laquelle la sonde devrait se trouver dans la zone externe de la ceinture de Kuiper (à environ 55 UA).

D'ici là, outre les études par occultations stellaires, on étudie ces corps glacés avec des observations photométriques effectuées par les grands télescopes spatiaux et terrestres. Ces observations nous permettent de nous renseigner sur différentes caractéristiques physico-chimiques d'un TNO, notamment sur sa période de rotation et sa forme, mais aussi sa composition chimique de surface et sa taille.

3.1.1 Période de rotation et forme

La modélisation de la courbe lumineuse reçue d'un TNO nous permet évidemment d'accéder à sa période de rotation, mais aussi à son axe de rotation et à sa forme. En effet, la variation de la magnitude nous informe sur les ratios entre ses différents axes a , b et c . Dans le cas exposé Figure 3.1, la variation de la magnitude d'un objet homogène s'exprime de la manière suivante :

$$\Delta m = 2.5 \log\left(\frac{\pi ac}{\pi bc}\right) = 2.5 \log\left(\frac{a}{b}\right) \quad (3.1)$$

Néanmoins, de telles variations de la magnitude ne sont pas nécessairement caractéristiques des dimensions de l'objet. En effet, une variation d'albédo peut également être à l'origine de celles-ci. Cela peut se traduire par la présence de tâches localisées (comme on pense qu'il en existe sur Pluton) mais aussi par un hémisphère beaucoup plus sombre que l'autre (comme la lune de Saturne nommée Japet, et parfois surnommée satellite *yin yang*).

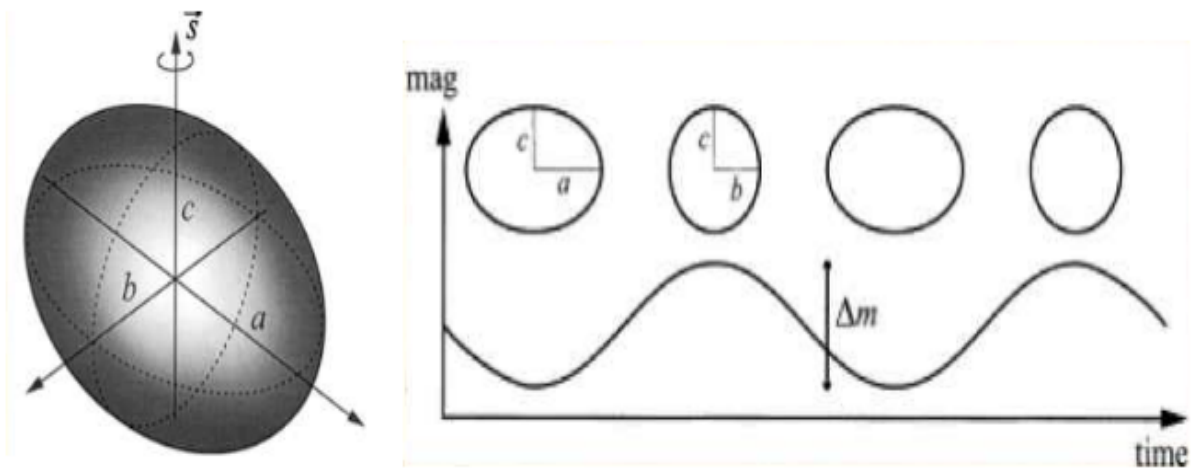


FIGURE 3.1 – Courbe du flux lumineux d'un corps ellipsoïde à la surface homogène

3.1.2 Composition chimique de surface

La spectroscopie, majoritairement celle dans le rouge et l'infrarouge, joue aussi un rôle important dans l'accumulation d'informations sur les TNOs. En effet, la forme générale du spectre nous renseigne sur la couleur du corps (par exemple, c'est ainsi qu'on a pu montrer qu'il semblerait que les Cubewanos «froids» sont de couleurs très rouge) tandis que les bandes d'absorptions nous renseignent sur la présence et l'abondance en surface d'éléments comme le méthane ($1.7\mu\text{m}$ et $2.3\mu\text{m}$) et l'eau ($1.5\mu\text{m}$ et $2.0\mu\text{m}$) par exemple.

3.1.3 Taille

La distance nous séparant des TNOs rend quasiment impossible la détermination de leur taille de manière directe. L'étude du flux lumineux des TNOs est alors l'unique moyen pour déterminer leur taille. En effet, le flux mesuré est fonction du diamètre de l'objet comme le décrit la formule de Russel (1916) qui s'exprime de la manière suivante :

$$p_v D^2 \Phi(\alpha) = 4R^2 \Delta^2 \times 10^{m_s - m_v} \quad (3.2)$$

- Avec : p_v l'albédo géométrique dans le visible
- D le diamètre de l'objet (km)
- $\Phi(\alpha)$ la fonction de phase de l'objet
- R sa distance héliocentrique (UA)
- Δ sa distance géocentrique (UA)
- m_s la magnitude apparente du Soleil
- m_v la magnitude apparente du TNO dans le visible.

Cependant, comme nous le montre la formule, ce flux lumineux est aussi dépendant de l'albédo géométrique de l'objet. Malgré le fait que cet albédo puisse être estimé à travers l'étude combinée du flux thermique émis par le TNO, l'albédo obtenu ne correspond qu'à une estimation. Un rapide calcul permet alors de nous rendre compte que, pour un TNO avec un albédo mesuré $p_v = 0.1$, une variation de 0.01 sur l'albédo géométrique de ce TNO entraînerait une variation de 5% du diamètre de celui-ci. Cette incertitude sur l'albédo d'un TNO pose donc un problème majeur.

La méthode des occultations stellaires permet de s'affranchir de cette hypothèse.

3.2 La méthode des occultations stellaires

On regroupe sous le nom d'occultations stellaires toutes occultations d'étoiles engendrées par un corps du système solaire. L'observation d'un tel événement a pour objectif principal de remonter à la forme et aux dimensions du corps occultant. Dans notre cas, on s'intéresse aux occultations stellaires provoquées par un TNO.

On peut considérer que l'étoile occultée se trouve à l'infini, la distance Terre-TNO étant infiniment plus petite que la distance Terre-Etoile. En partant de ce principe, l'ombre du TNO projetée à la surface de la Terre correspond ni plus ni moins qu'à sa forme. Chaque site se trouvant sur le passage de cette ombre va alors observer une variation de la courbe lumineuse «Etoile+TNO» : au moment du début de l'occultation aussi appelé temps d'immersion T_{imm} , ainsi qu'au moment de la fin de l'occultation aussi appelé temps d'émersion T_{eme} . Entre ces temps T_{imm} et T_{eme} , le flux lumineux observé sera uniquement celui que nous recevons du TNO. En connaissant la vitesse relative de celui-ci par rapport à l'étoile, on est alors capable de calculer la distance sur laquelle le TNO a occulté l'étoile : c'est ce que l'on appelle les cordes d'occultation.

L'accumulation de ces cordes d'occultation obtenues sur les différents sites ayant observés l'événement va ainsi nous permettre de remonter à la forme et aux dimensions de l'objet, et ce de manière bien plus précise que ce que permettent les autres méthodes d'observations (Figure 3.2). En effet, si le pas de temps entre chaque image est suffisamment petit (de l'ordre de la seconde ou moins), cette méthode va nous permettre de remonter aux dimensions de l'objet avec une précision angulaire de l'ordre du milli-arcseconde (Thèse, Berthier 1997). Pour avoir une meilleure idée de ce que représente cette précision, une erreur angulaire de 1 milli-arcseconde (mas) équivaut à un décalage d'environ 31 km au niveau de l'orbite d'un objet se trouvant à 45 UA (comme Varuna par exemple) !

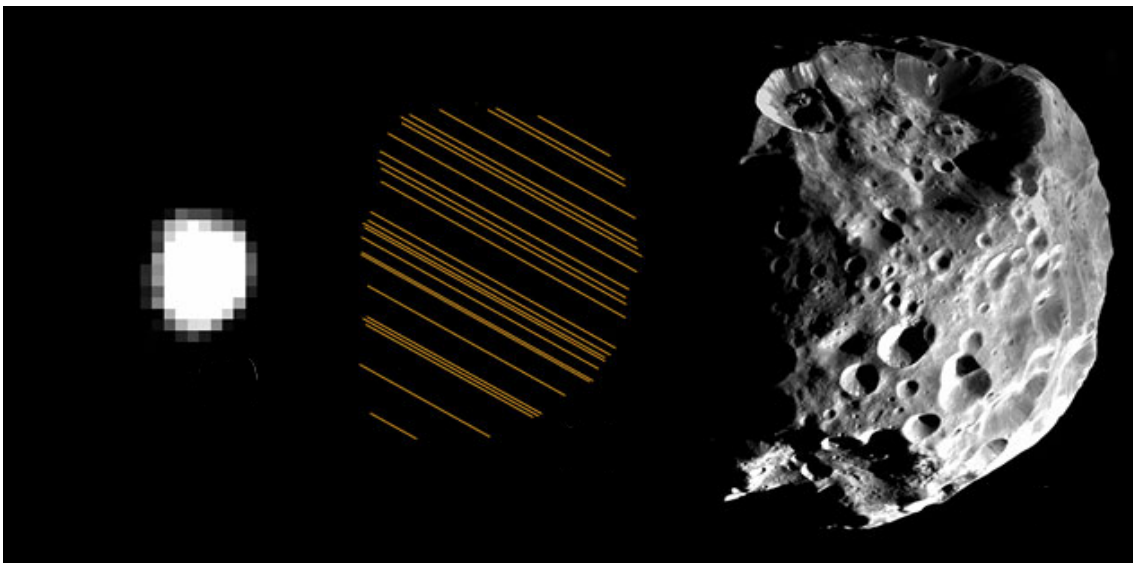


FIGURE 3.2 – La «lune-astéroïde» Phoebe (230x220x210 km) étudiée selon les trois méthodes exposées précédemment. De gauche à droite : 1.) Par le VLT (8m) + optique adaptative. Résolution obtenue : environ 60km, 2.) Par occultation stellaire (25 observateurs), selon une résolution temporelle de 0.1 seconde. Résolution obtenue : environ 1km, 3.) Par exploration *in-situ*, mission Cassini-Huygens - crédit : NASA-JPL -. Résolution obtenue : environ 15m

Chapitre 4

Méthodologie d'acquisition des données d'occultations

4.1 Prédiction d'une occultation

Pour prédire une occultation stellaire, il est nécessaire de connaître précisément le mouvement de l'objet à étudier, mais aussi d'avoir des coordonnées très précises des étoiles sur la sphère céleste. Ces coordonnées correspondent à l'ascension droite et à la déclinaison. L'étude faite en amont de chaque occultation afin de les caractériser au mieux est appelée étude astrométrique.

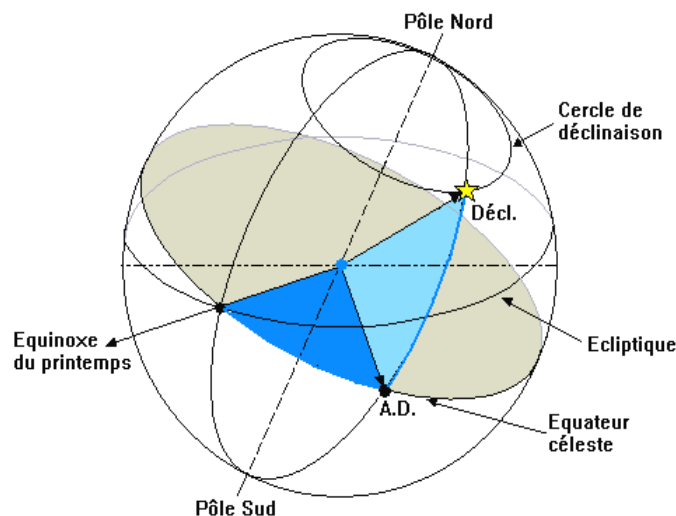


FIGURE 4.1 – Le système de coordonnées célestes. Ce système est la projection sur la voûte céleste du système de coordonnées angulaire sur Terre (représentée par le point bleu clair au centre de la sphère). Tout objet dans le ciel est référencé par son ascension droite (A.D.) et sa déclinaison (Décl.).

Une étude astrométrique de très grande précision est absolument fondamentale dans le domaine des occultations stellaires par des TNOs. En effet, à cause de leur petite taille et de leur très grande distance à la Terre, il est nécessaire d'avoir un catalogue stellaire très précis afin d'obtenir les meilleurs paramètres orbitaux possibles pour le TNO. Une fois ces paramètres orbitaux connus, il va alors être possible de «construire» l'orbite de l'objet, c'est à dire de connaître sa position dans le ciel à n'importe quel moment. Cette table journalière des positions célestes d'un corps du système solaire correspond à son éphéméride. Ainsi, il faut que la position du TNO prévue par l'éphéméride coïncide avec la position céleste d'une étoile pour qu'il y ait occultation stellaire.

4.1.1 Catalogue et astrométrie stellaire

Il existe un certain nombre de catalogues stellaires. Ces catalogues se différencient les uns des autres à travers leur précision astrométrique (exprimée en milli-arcseconde, mas) et la magnitude limite des étoiles qui y sont référencées. Il y a donc un certain compromis à trouver, car un catalogue ne référencant que les étoiles brillantes sera d'une grande précision astrométrique mais ne sera que faiblement fourni, tandis qu'un catalogue recensant aussi les étoiles très faiblement brillantes sera bien plus complet mais présentera une astrométrie beaucoup moins précise.

Voici quelques exemples des catalogues les plus utilisés :

Catalogue	Auteur (date)	Mag. limite	Préc. Astromét.	Nb. Etoiles
HIPPARCOS	Perryman et al. (1997)	9	1 mas	118218
TYCHO-2	Høg et al. (2000)	12	32 mas	$2,5 \cdot 10^6$
UCAC2	Zacharias et al. (2004a)	16	15 - 70 mas	$4,83 \cdot 10^7$
UCAC3	Zacharias et al. (2010)	16	15 - 100 mas	$1,0 \cdot 10^8$
USNO B1.0	Monet et al. (2003)	21	200 mas	$1,05 \cdot 10^9$

Une fois qu'une occultation est prédite, une étude astrométrique approfondie est effectuée dans le but de déterminer de manière la plus précise possible la position de l'étoile. En effet, par exemple pour une distance Terre-TNO = 40 UA, une variation angulaire de 1 mas correspond à un décalage de 29 km au niveau du TNO. Ainsi, il est primordial que l'erreur sur la position de l'étoile soit au moins inférieure à 50 mas (environ 1450 km au niveau du TNO). Pour cela, une collaboration avec l'Observatoire National brésilien (*Observatorio Nacional*) et l'ESO (*European Southern Observatory*) a été mise en place afin d'avoir du temps d'observation, notamment sur le télescope de 2,2m MPG/ESO de La Silla qui est équipé d'une caméra WFI (*Wide Field Imager*). La plupart des gros TNOs (le système Pluton-Charon, Eris, Makemake, Varuna, etc etc...) ont donc bénéficié d'une étude astrométrique stellaire approfondie sur la trajectoire de leurs éphémérides.

4.1.2 Ephémérides et offset orbitaux

Tout comme la précision des catalogues stellaires, la précision des éphémérides des TNOs doit être élevée afin de prédire une occultation. Toutefois, il existe une différence majeure par rapport aux étoiles : il existe une «dérive» des éphémérides. Cette dérive correspond à la différence entre la position réelle du TNO (c'est à dire celle que l'on observe) avec la position donnée par les éphémérides. Normalement, cette dérive, aussi appelé *offset*, augmente de manière linéaire avec le temps. À tout instant, la dérive de l'ascension droite (4.1) et de la déclinaison (4.2) est donnée par les formules suivantes :

$$Offset_{(A.D.)} = (\alpha_{eph.} - \alpha_{obs.}) \times \cos(\delta_{eph.}) = \Delta\alpha \times \cos(\delta_{eph.}) \quad (4.1)$$

$$Offset_{(Decl.)} = \delta_{eph.} - \delta_{obs.} = \Delta\delta \quad (4.2)$$

La Figure 4.2 (cf. page suivante) illustre les valeurs de l'offset de Pluton mesuré à des dates où a eu lieu une occultation stellaire par celui-ci. Ces différents points ont alors permis d'extrapoler une droite de l'évolution moyenne de l'offset de Pluton, mais on remarque facilement qu'elle est soumise à des incertitudes de l'ordre de 10 à 20 mas.

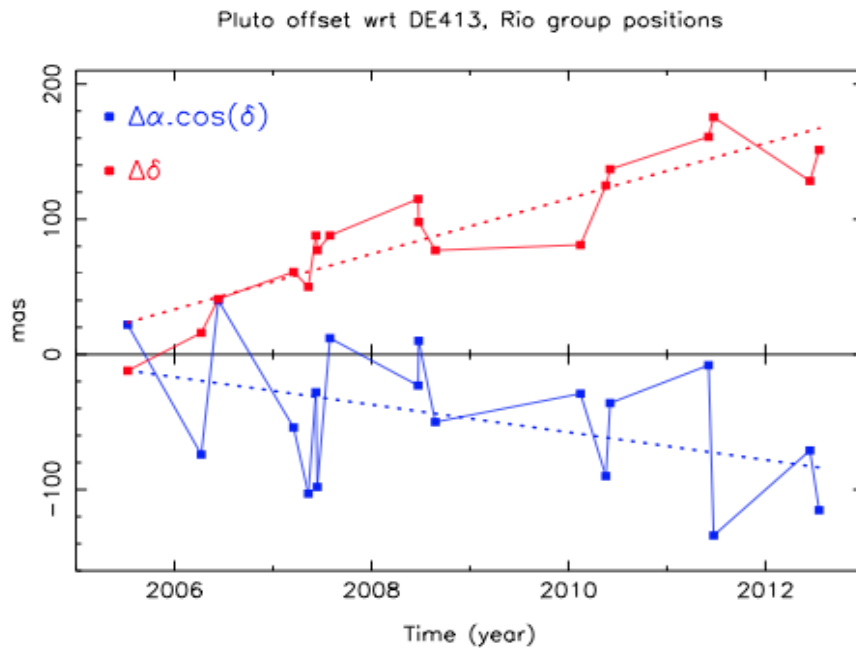


FIGURE 4.2 – Evolution de l'offset de Pluton en fonction du temps par rapport à l'éphéméride DE413 (2004). En rouge : l'offset de la déclinaison qui évolue de manière approximativement linéaire dans le temps, environ +20 mas/an. En bleu : l'offset de l'ascension droite qui évolue de manière plus bruitée et d'environ -10 mas/an.

C'est en considérant l'évolution de l'offset des éphémérides que l'on peut déterminer le plus précisément possible quelles seront les coordonnées céleste d'un TNO à telle ou telle date. Ce sont ces coordonnées là qui seront comparer aux données des catalogues stellaires afin de prédire une occultation. Evidemment, une mesure très précise de cet offset est effectué quelques jours avant l'événement dans le but de déterminer quelle est la zone sur Terre où l'événement est susceptible d'être observé (Figure 4.3). En effet, ce type d'étude faite quelques jours avant un événement permet de s'affranchir de l'hypothèse sur l'évolution de l'offset en fonction du temps : sur quelques jours, la valeur de l'offset n'a pas le temps de varier de manière significative. Les erreurs qui en résultent sont donc réduites.

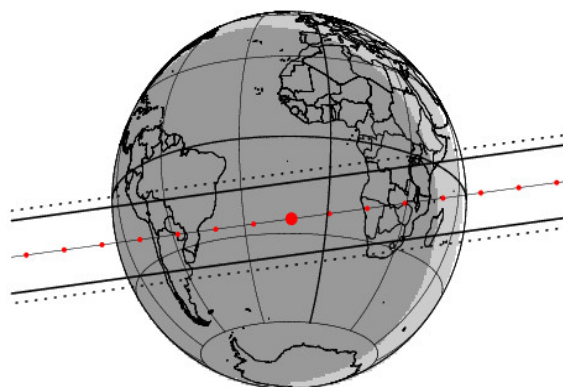


FIGURE 4.3 – Représentation de la «bande» terrestre où il était prévu que l'ombre de Pluton passe lors d'une occultation prédite pour le 16/06/2013 vers 2h00 du matin heure universelle (UT). Les traits pleins correspondent à la trajectoire prévue de l'ombre géométrique de Pluton, tandis que les pointillés représentent l'extension de l'atmosphère de la planète naine. Le gros point rouge correspond à l'endroit où le centre de Pluton doit être au plus proche du géocentre terrestre (C/A). Un laps de temps d'une minute sépare chacun des points rouges.

4.2 Sélection et campagne d'observations

4.2.1 Sélection des occultations

Une étude poussée de l'astrométrie et de l'offset demandant beaucoup de temps et d'efforts, une sélection des occultations «exploitables» est effectuée. En effet, toutes occultations ne donnent pas nécessairement des données de même qualité. Les deux facteurs influant sur cette sélection sont (1) la magnitude de l'étoile et (2) la vitesse de l'événement.

La première de ces deux raisons est assez évidente : il faut que les étoiles aient une magnitude suffisamment faible pour être référencée dans un catalogue stellaire mais aussi pour observer distinctement la chute du flux lumineux lors de l'occultation. En effet, si la magnitude de l'étoile est trop grande, la chute du flux lumineux est difficile à distinguer du bruit.

En ce qui concerne la vitesse de l'événement, plus la vitesse relative du TNO par rapport à l'étoile est «lente», plus il sera facile d'observer la baisse du flux lumineux, en utilisant un temps de pose plus long. A contrario, un événement rapide nécessitera un temps de pose court afin de pouvoir être observé.

Ainsi, pour chaque étoile où une occultation a été prédite, on normalise la magnitude apparente M de celle-ci par une vitesse typique d'une occultation par un TNO : 20 km/s. On obtient ainsi la magnitude M^* de l'étoile, qui sera supérieure à M dans le cas où l'événement aurait une vitesse supérieure à 20 km/s, et qui sera inférieure à M dans le cas d'un événement lent avec une vitesse inférieure à 20 km/s. La formule s'exprime de la manière suivante :

$$M^* = M + 2,5 \log_{10} \left(\frac{v}{20 \text{ km.s}^{-1}} \right) \quad (4.3)$$

De manière générale, les occultations présentant une magnitude M^* inférieure ou égale à 18 sont sélectionnées.

4.2.2 Campagne d'observations

C'est seulement une fois qu'une occultation est sélectionnée que l'étude astrométrique approfondie visant à caractériser l'offset (cf. partie 4.1.2) est effectuée. Il en résultera donc un lieu où l'occultation aura lieu. Au fur et à mesure que l'événement se rapproche et que les prédictions se précisent, les observatoires professionnels et amateurs susceptibles d'être concernés par l'occultation sont alertés. Quand un grand télescope est concerné par une occultation (comme par exemple le VLT 8m de l'ESO), une demande d'allocation de temps d'observation est transmise (ToO : *Target of Opportunity*, ou DDT : *Director's Discretionary Time*).

Chaque année, une quinzaine de campagne sont menées mais la majeure partie des occultations potentielles sont référencées sur le site personnel de Mr Sicardy à l'adresse suivante : <http://www.lesia.obspm.fr/perso/bruno-sicardy/>.

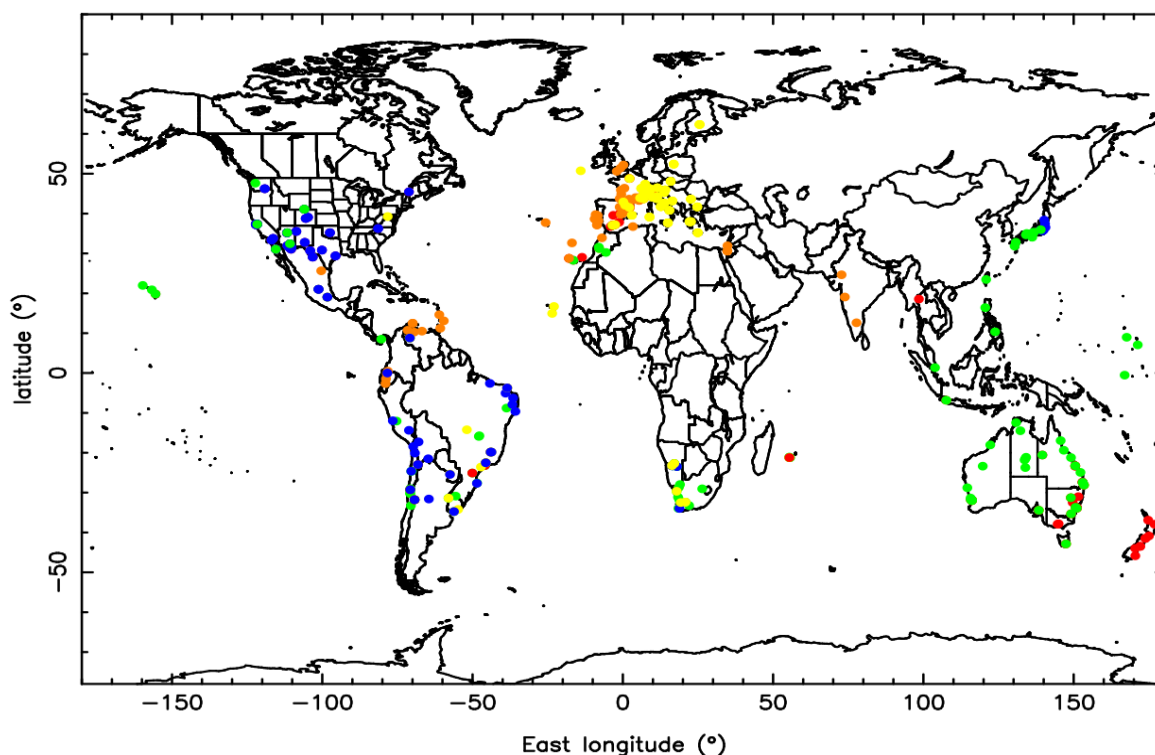


FIGURE 4.4 – Carte du monde représentant les différents observatoires professionnels et amateurs ayant participé à au moins une campagne d’observation. L’Océanie, le Japon, les pays européens et les pays d’Amérique du Nord et du Sud sont les principaux collaborateurs.

4.3 Observation et réduction des données

4.3.1 Matériel d’observation

L’objectif premier d’une occultation étant de déterminer la taille de l’objet avec une précision de l’ordre kilométrique, il est absolument primordial que chaque station se situe précisément en longitude et en latitude sur le globe terrestre, mais surtout que toutes les stations soient synchronisées sur le temps universel. Pour cela, on utilise habituellement un GPS qui fournit une précision spatio-temporelle de l’ordre du mètre et de la milliseconde, ou des protocoles internet de type NTP.

Ensuite, dans la mesure où les occultations sont des événements rapides exigeant une grande quantité d’images, la caméra CCD est l’outil le plus adapté à l’acquisition de données. Malheureusement, les caméras CCD les plus fréquemment utilisées dans les observatoires présentent un problème majeur : l’existence d’un écart entre chaque intégration, appelé couramment «*Dead Time*» (DT). Cet intervalle, correspond au temps nécessaire à la caméra pour télécharger et enregistrer chacune des images sur son disque. Cela représente une perte réelle de l’information, car pendant cet intervalle, nous n’avons aucune information sur la variation possible du flux de l’étoile. Par exemple, en considérant une vitesse $v = 25 \text{ km/s}$ et un DT de 2 secondes, une occultation qui débiterait durant le DT donnerait lieu à une incertitude de 50 km sur la dimension de l’objet.

Enfin, d’un point de vue technique, il est normalement préféré de ne pas utiliser de filtres dans la mesure où il est préférable de mesurer le plus grand nombre possible de photons afin d’avoir le plus net signal possible. Mais, dans les circonstances de pleine Lune ou d’une intense pollution lumineuse, l’utilisation d’un filtre rouge (R, NIR ou IR) peut améliorer le contraste entre l’étoile et le bruit du ciel.



FIGURE 4.5 – Exemple du matériel nécessaire à l'observation. À gauche du terminal : l'antenne GPS nécessaire pour dater les images. À droite du terminal : Caméra CCD adapté à l'observation d'occultations stellaires (modèle Raptor/Merlin)

4.3.2 Réduction des données

Pré-traitement

La première étape du pré-traitement des données consiste à caractériser la variation du flux lumineux engendré par les perturbations atmosphériques. Pour cela, on mesure le flux lumineux d'étoiles de référence se trouvant à proximité de l'étoile occultée car on suppose que cette dernière est affectée de la même manière que les étoiles dans son voisinage proche. On divise donc le flux stellaire par celui des étoiles de référence. On normalise ensuite le flux lumineux de l'étoile occultée (avec la contribution éventuelle du corps occultant) à un. Un exemple de résultat obtenu suite à ces deux étapes est donné par la figure (4.6).

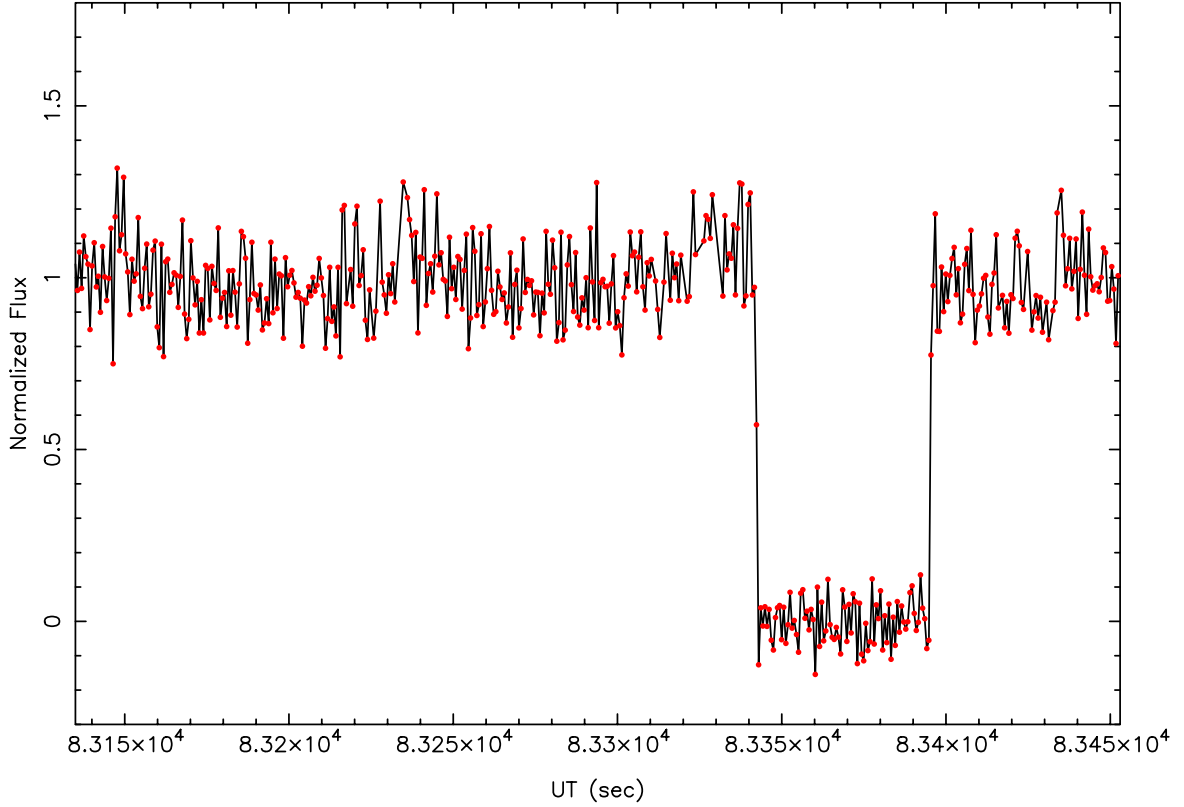


FIGURE 4.6 – Courbe de lumière obtenue après pré-traitement suite à l’occultation de Varuna du 19 Février 2010 observée à Sao Luis (Bresil). Le flux lumineux hors occultation tourne autour d’une valeur égale à 1, tandis qu’au moment de l’occultation le flux lumineux est proche de zéro (en fait égal au flux de Varuna).

Traitement des données

L’objectif premier du traitement des données est de définir les temps du début et de fin d’occultation (aussi appelé temps d’immersion et d’émersion) afin d’obtenir les cordes d’occultations. Afin d’y parvenir, on utilisera un programme écrit par Mr. Sicardy. L’objectif de ce progamme est de faire coïncider au mieux les données observées avec un modèle. Ce modèle prend notamment en compte le diamètre angulaire de l’étoile dans le plan du ciel à la distance du TNO, la vitesse de l’événement, la longueur d’onde d’observation ainsi que la diffraction de Fresnel. La probabilité des différents $t_{immersion}$ et $t_{émersion}$ modélisés est calculée à l’aide d’un test du χ^2 (équation 4.4), et les valeurs retenues pour ces différents temps correspondent à celles possédant une valeur de χ^2 minimale. Les barres d’erreurs à 1σ (68,2 %) et à 3σ (99,4 %) sur ces temps peuvent être définies en mesurant les intervalles correspondant à des variations de χ^2 de χ_{min}^2 à $\chi_{min}^2 + 1$ et $\chi_{min}^2 + 9$, respectivement.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N (x_{i,obs} - x_{i,cal})^2 / \sigma_i^2 \quad (4.4)$$

avec :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (x_{i,obs} - \bar{x})^2} \quad (4.5)$$

Pour terminer, la mesure du $\chi^2_{réduit}$ (équation 4.6) va nous permettre de valider ou non notre modèle ; la valeur théorique du $\chi^2_{réduit}$ étant égale proche de 1 dans le cas d'un modèle cohérent.

$$\chi^2_{réduit} = \left(\frac{\chi^2_{min}}{N_{fit} - M} \right) \quad (4.6)$$

avec : N_{fit} le nombre de points à «Fitter», et M le nombre de paramètres libres. Dans le cas de notre étude, $M = 1$ car seul le temps est le paramètre libre.

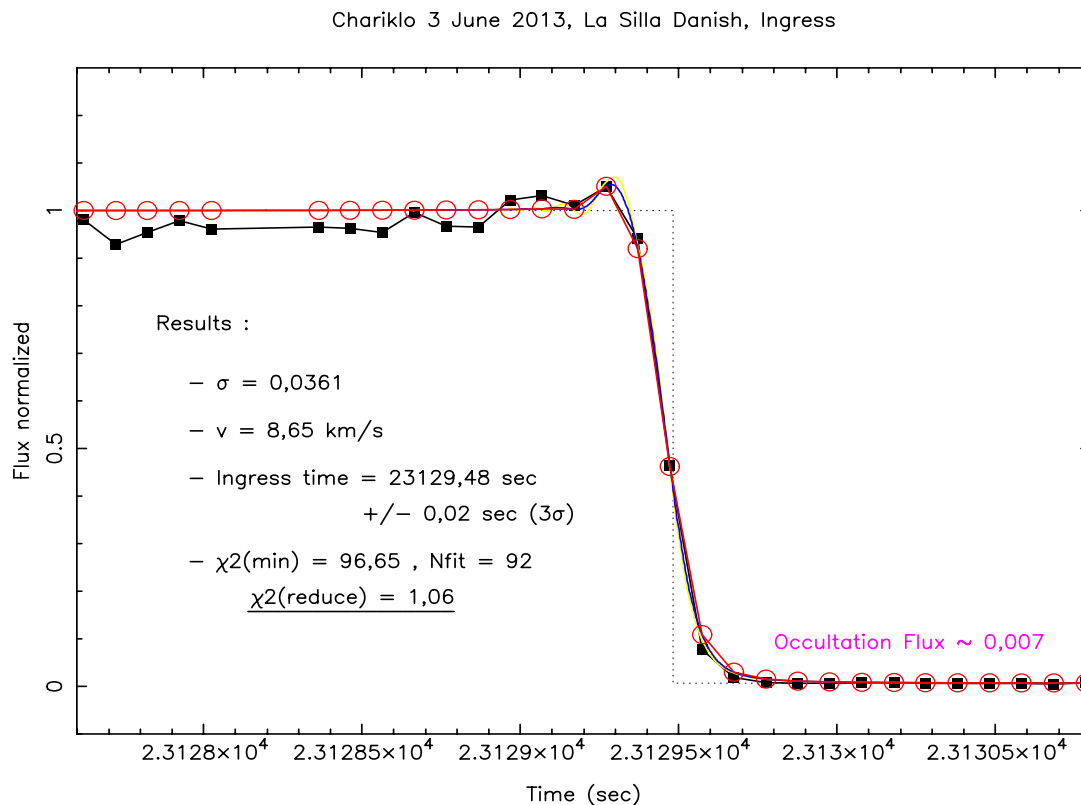


FIGURE 4.7 – *Fit* du temps d’immersion au télescope La Silla Danish (Chili) pour l’occultation de Chariklo le 2 Juin dernier. Les données observées sont représentées par les carrés noirs, le pointillé correspond à l’ombre géométrique, la courbe jaune représente l’effet attendu pour la diffraction de Fresnel, les cercles rouges représentent ce que le modèle prévoit pour chacune des données observées, et la courbe bleue est l’équivalent de la droite rouge une fois convoluée par le temps de pose pour chaque donnée (dans ce cas $\approx 0,1$ sec). Dans le cas suivant, le temps est très bien contraint ($\pm 0,02$ sec pour 3σ), et le $\chi^2_{réduit}$ est presque égal à 1 (qui est sa valeur théorique).

Chapitre 5

Mise en contexte du stage

5.1 Généralités sur Varuna

5.1.1 Généralités et propriétés orbitales

Découvert en Novembre 2000 suite au projet *Spacewatch*, Varuna fut tout d'abord nommé provisoirement 2000 WR106. Par la suite, pour célébrer sa découverte (il était alors le plus gros TNO jamais découvert) ainsi qu'en commémoration de la découverte de Cérès 200 ans auparavant, le Minor Planet Center lui attribua le numéro "20000". Voici un tableau récapitulant ses différents paramètres orbitaux :

a (UA)	p (UA)	e	i (°)	P (années)
43.2	40.9	0.053	17.1	283.82

5.1.2 Nature de la surface

Une étude spectroscopique, menée au début des années 2000 avec la caméra-spectromètre proche infrarouge *NICS* ("Near Infrared Camera and Spectrometer") du télescope *TNG* ("Telescopio Nazionale Galileo") sur l'île de La Palma, a mis en évidence un spectre très "rouge" ainsi que la signature de glace d'eau à la surface de Varuna grâce aux pics d'absorption à 1.5 et 2.0 μm (Licandro et al. 2001).

5.1.3 Forme de Varuna

Comme le montre la Figure 5.1 (cf. page suivante), Varuna présente de grande variation de sa magnitude lumineuse ($\Delta m = 0,42$) ainsi qu'une période de rotation très rapide $P_{\text{rotation}} = 6,34$ heures (Jewitt and Sheppard 2002).

La présence d'un double pic de magnitude durant une même période de rotation rend la courbe lumineuse de Varuna compatible avec un ellipsoïde de Jacobi en équilibre hydrostatique (Lacerda and Jewitt 2007). L'ellipsoïde de Jacobi étant une forme appartenant à la famille des sphéroïdes, qui est atteinte lorsque le corps est en équilibre hydrostatique sous l'effet de sa gravité et de sa rotation ; Son équation s'écrit de la manière suivante :

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1, \quad (5.1)$$

où a, b, c dépendent de la masse volumique et de la vitesse angulaire du corps.

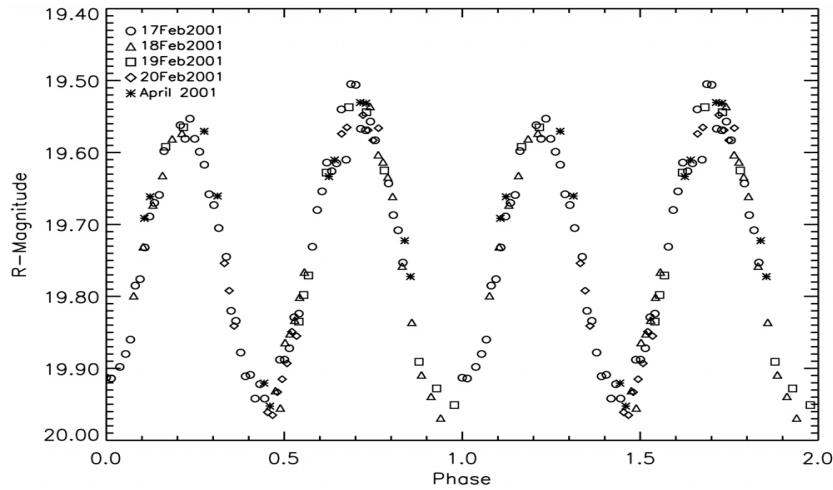


FIGURE 5.1 – Graphique représentant deux périodes de la variation du flux lumineux de Varuna (Février 2001). Avec l’heure de chacune des mesures, ce graphique a permis à Jewitt et Sheppard (2002) d’en déduire la période de rotation de Varuna : $P_{\text{rotation}} = 6,34$ heures. On remarquera qu’une même période est constituée de deux pics de magnitude quasiment identiques.

Dans le cas d’un ellipsoïde de Jacobi, les dimensions de a , b et c sont toutes les trois différentes avec $a > b > c$ (comparativement au cas de la sphère parfaite où on observe $a = b = c$). Cette forme en «cigare» (Figure 5.2) s’explique par un très grand moment angulaire, et donc une période de rotation très rapide (Chandrasekhar 1987).

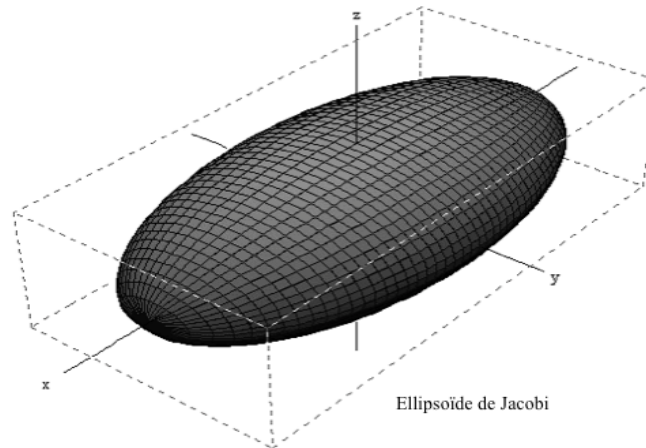


FIGURE 5.2 – Représentation d’un ellipsoïde de Jacobi, avec $a > b > c$

Cette forme assez inhabituelle est à l’origine des grandes incertitudes concernant les dimensions de Varuna. En effet, Varuna nous présente une surface qui n’est pas la même selon le moment où on l’observe. Cela engendre une variation du flux lumineux ; on aura ainsi tendance à surestimer les dimensions de Varuna quand celui-ci nous présentera une surface maximale et on aura tendance à sous-estimer les dimensions dans le cas d’une surface visible minimale. C’est pourquoi on trouve des valeurs du diamètre apparent ($D_{\text{équiv}}$) de Varuna très différentes dans la littérature, allant de $502^{+64}_{-69,5}$ km (Stansberry et al. 2007) jusqu’à 1060^{+180}_{-220} km (Lellouch et al. 2002).

$$D_{\text{équiv}} = 2 \times \sqrt{a \cdot c} \quad (5.2)$$

Pour finir, en faisant l’hypothèse d’un ellipsoïde de Jacobi avec $D_{\text{équiv}} = 900$ km, Lacerda et Jewitt (2007) ont obtenu une densité $\rho_{\text{Varuna}} = 0,992^{+0,086}_{-0,015}$ g/cm³.

5.2 Ancienne occultation : 19 Février 2010

Le 19 Février 2010 eut lieu une première occultation d'une étoile de magnitude $M_{\text{rouge}} = 12$. Cette occultation fut observée à un seul endroit par Mr François Colas et ses collègues (São Luiz do Maranhão) avec un corde d'occultation obtenue mesurant 1003 km.

Chose remarquable, l'occultation ne fut pas visible dans la ville de Quixadá qui se situe à seulement 200 km au sud de São Luiz. Même si l'occultation n'a pas pu y être observée, cette information a apporté des contraintes fortes sur la forme de Varuna, et a notamment apporté un argument supplémentaire à la théorie de l'ellipsoïde de Jacobi. De plus, au moment de l'événement, Varuna était proche de sa brillance maximale, et donc proche du maximum de superficie apparente. En ajoutant cette information aux précédentes, trois solutions limites ont été obtenues et il a été possible d'estimer leur probabilité. La solution limite la plus probable est celle de l'ellipsoïde de Jacobi, avec des valeurs $a = 860$ km et $c = 375$ pour un albédo de 0,04 (Sicardy et al. 2010) (Figure 5.3).

Enfin, l'analyse de l'allure de la courbe lumineuse de São Luiz a révélé une chute abrupte de luminosité, montrant que Varuna ne possède pas d'atmosphère à des niveaux de quelques dizaines de nanobars.

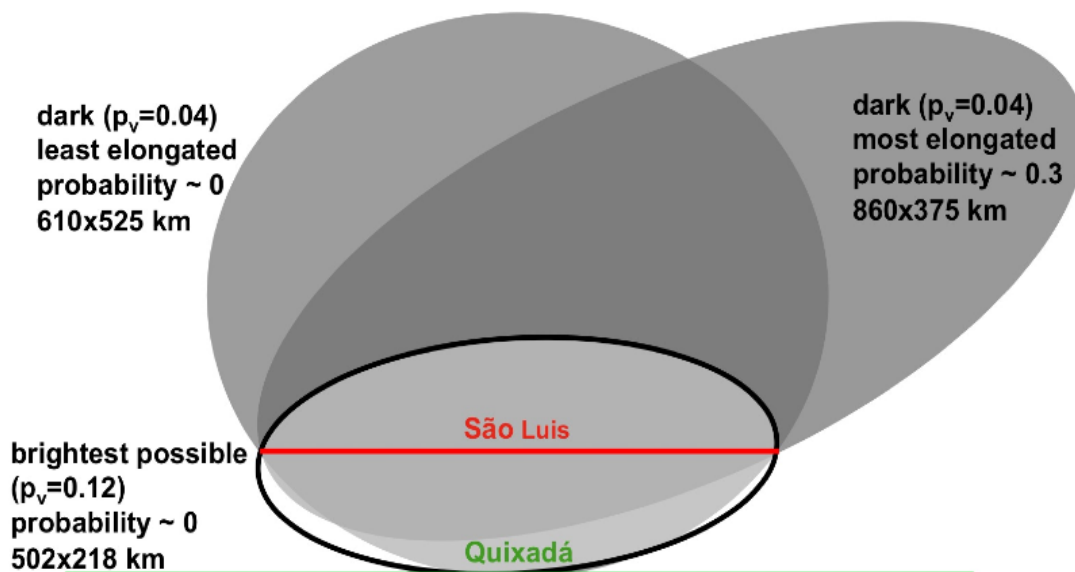


FIGURE 5.3 – Trois solutions limites pour la forme de Varuna. On comprendra facilement ici que le non-événement de Quixadá est une contrainte très forte qui est à l'origine de la probabilité quasi-nulle de deux des trois solutions limites.

Toutefois, ces résultats ne procurent que des solutions «extrêmes» pour Varuna. Une seconde occultation est donc nécessaire afin de pouvoir définir les dimensions de Varuna de manière quantitative.

5.3 Objectif du stage

Malgré le fait que cette méthode des occultations stellaires soit aujourd'hui bien au point, elle est soumise à diverses difficultés, notamment en ce qui concerne le traitement des données. En effet, parce que les observations se font à des endroits différents et avec du matériel de qualité différente, il est fréquent de rencontrer des problèmes de *timing* et de qualité des données (d'un site à l'autre le pas de temps entre chaque image et les conditions d'observations peuvent être très différentes). Aussi, il est nécessaire de garder à l'esprit que, de part leurs petites tailles ($r < 1200\text{km}$ pour le moment) et leurs grandes distances au Soleil (au-delà de 30 UA), une occultation stellaire par un TNO reste un phénomène rare, très court, et observable de manière très localisée (et donc par un petit nombre d'observatoires).

Comme on a pu le voir précédemment, les dimensions de Varuna sont encore très mal contraintes notamment à cause de sa forme si caractéristique. Par conséquent, l'objectif de mon stage a été d'essayer de mieux les contraindre à l'aide des données obtenues le 8 Janvier 2013, cette occultation stellaire n'ayant pu être que partiellement traitée par l'ancien doctorant de Mr Sicardy, Mr Braga Ribas (e-mail : ribas@on.br).

Chapitre 6

Varuna : l'événement du 08/01/2013

6.1 Astrométrie et prévision

Au cours de l'année 2012, l'analyse des éphémérides de Varuna a permis d'identifier l'étoile *UCAC3 233089504* comme étant susceptible d'être occultée par Varuna. Cette étoile, de magnitude $R = 16.5$, a alors été étudiée afin de déterminer sa position exacte sur la voûte céleste. Voici la position obtenue :

$$\begin{cases} \alpha = 117.40417125^\circ \\ \delta = 26.43110528^\circ \end{cases}$$

Dans le même temps, les premières études de l'offset donnaient une occultation visible depuis la péninsule du Kamtchatka (Russie). Finalement, la mesure de l'offset ayant évolué au fur et à mesure que la date de l'occultation approchait, les dernières prévisions (obtenues grâce à des données acquises dans la nuit du 6 au 7 Janvier au Pic du Midi) donnèrent une occultation visible 3000 km au Sud, en plein centre du Japon (Figure 6.1).

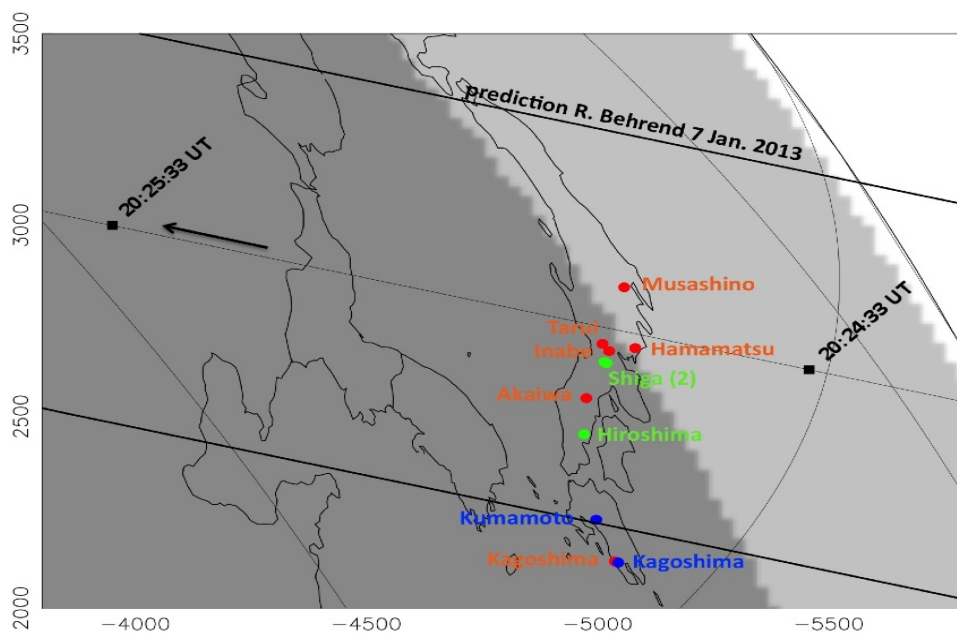


FIGURE 6.1 – Carte de prédiction de l'occultation avec les différents sites ayant participé à la campagne d'observation. Cette prévision a été obtenue à partir de la mesure de l'offset de Varuna la veille de l'occultation (données acquises au Pic du Midi dans la nuit du 6 au 7 Janvier). Finalement, en vert sont représentés les lieux ayant pu observer l'occultation, en rouge les sites n'ayant pu l'observer à cause d'une mauvaise météo, et en bleu les sites n'ayant pas détecté de chute de flux lumineux.

6.2 Observation et instruments

Dans ce cas-ci, le décalage vers le Sud des prévisions fut très positif car permettant de mobiliser un bien plus grand nombre d'observatoires professionnels et amateurs. Malheureusement, des conditions météorologiques défavorables rendirent impossibles l'observation de l'événement : seul les observatoires à Shiga (amateurs) et celui d'Hiroshima (professionnel) détectèrent l'événement. Toutes les informations relatives aux instruments mobilisés pour la campagne d'observation ont été regroupé dans le journal de bord ci-dessous (Table 6.1).

Une première analyse des données positives obtenues a permis de mettre de côté les données acquises par Mr Ishida à Shiga, ces données présentant des problèmes (timing, signal sur bruit...). Seul deux jeux de données ont donc été analysés.

TABLE 6.1 – Varuna, January 8, 2013

Site	Observers	instrument	camera, exp. time	result
Kagoshima Univ Obs, Satsumasendai, Kagoshima 134 :00 :08 34 :53 :38 470m (JGD2000=WGS84)	Ryo Miyanoshita, Kazuma Ando	100cm C	Cooled CCD 10 s	negative
Akaiwa-Ryuten-obs, Akaiwa, Okayama 134 :00 :08 34 :53 :38 470m (JGD2000=WGS84)	Naoto Tatsumi (JOIN :14052)	40cm F4 N		clouded
Tarui, Gifu 136 :29 :43.5 35 :23 :41.5 84m (JGD2000=WGS84)	Hiroyuki Watanabe (JOIN :14053)	35cm C F1.9	TGv-M	clouded
Musashino, Tokyo 139 :33 :41.2 35 :42 :36.9 66m (JGD2000=WGS84)	Katsuhiko Kitazaki (JOIN :14054)	40cm F10.1 C		clouded
Sendai-Uchukan, Satsumasendai, Kagoshima 130 :20 :23.34 31 :49 :26.43 248m (JGD2000=WGS84)	Tsutomu Hayamizu (JOIN :14055)	50cm F12 C	WAT-120N+	clouded
Inabe, Mie 136 :3 :24.7 35 :10 :14.7 187m (JGD2000=WGS84)	Akira Asai (JOIN :14056)	35.5cm F11 SC	TGv-M	clouded
Hamamatsu, Shizuoka 137 :44 :23.0 34 :43 :07.0 17m (JGD2000=WGS84)	Minoru Owada (JOIN :14058)	25cm F12 SC	WAT-120N Slow shutter 256Fr	clouded
Higashi-Hiroshima obs, Hiroshima 132 :46 :36 34 :22 :39 511.2m (JGD2000=WGS84)	Ryosuke Itoh, Yuki Moritani Makoto Uemura, Issei Ueno Kenji Kawaguchi (JOIN :14079)	150cm F12.2 RC	CCD C9100-12 0.3 sec deadtime 0.0029 sec	positive
Moriyama, Shiga 135 :59 :23.8 35 :02 :59.1 105m (JGD2000=WGS84)	Yasukazu Ikari (JOIN :14092)	26cm F7	CCD Apogee U6 10 s deadtime 1.65 s	positive
Moriyama, Shiga 135 :56 :33.6 35 :06 :22.3 85m (JGD2000=WGS84)	Masayuki Ishida	30cm F10 SC	WAT-120N+ Slow shutter 256Fr 8.542 s	positive but inconclusive
Kumamoto 130 :45 :32.03 32 :48 :36.03 45m (JGD2000=WGS84)	Kazuhisa Kageyama	25cm F3.3 N	WAT-120N Slow shutter 128Fr	negative

6.3 Résultats

6.3.1 Mesure de l'offset du photocentre

Obtenir deux cordes d'occultations (donc deux points d'immersion et d'émersion) constitue une bonne base afin de remonter à la forme d'un objet. Cependant, il existe une infinité d'ellipses passant par 4 points car une ellipse est définie par 5 paramètres :

a : la dimension du demi-grand axe de l'ellipse

b : la dimension du demi-petit axe de l'ellipse

P : l'angle entre la direction du Nord et le demi-petit axe

(x ; y) : le couple de coordonnées définissant la position du centre de l'ellipse

Mon premier travail a donc consisté à obtenir ce cinquième point. Le centre de l'ellipse étant le seul point pouvant être déduit à partir des données acquises, j'ai donc cherché à déterminer le couple (x ; y).

Pour cela, j'ai appliqué la méthode de détermination de l'offset à différents jeu de données acquises juste avant et juste après l'occultation. En effet, la valeur de l'offset ne variant théoriquement que très peu sur deux ou trois jours, le but a été de voir si les observations faites les jours proches de l'occultation permettaient de faire ressortir des valeurs quasi constantes pour le couple (x ; y) et qui définirait ainsi précisément l'offset du centre de Varuna au moment de l'occultation.

Tout d'abord, nous sommes partis du principe que la surface de Varuna est suffisamment homogène en terme d'albédo pour considérer que le «centre physique» de Varuna coïncide avec son «photo-centre». Cette hypothèse de base, qui est valable que pour une très grande majorité des corps telluriques, (à l'heure qu'il est seul la lune Japet est connue pour posséder des variations locales d'albédos suffisamment fortes pour que son photo-centre se distingue de son centre physique), va nous permettre d'utiliser directement les données utilisées par les équipes de prédiction afin de déterminer le lieu de l'occultation.

J'ai donc utilisé les réductions obtenues par trois équipes différentes pour des données venant de l'observatoire du Pic du Midi. L'occultation ayant eu lieu autour de 20h24 UT (Universal Time) dans la nuit du 8 au 9 Janvier, les réductions viennent d'observations faites durant les nuits entre le 5 et le 9 Janvier :

	5-6 Janvier	6-7 Janvier	7-8 Janvier	8-9 Janvier
Mr Vachier (France)	X	X		X
Mr Behrend (Suisse)	X	X	X	
Mr Camargo (Bresil)		X		X

Pour chaque nuit, ces équipes m'ont transmis un fichier comprenant la position observée (α_{obs} ; δ_{obs}) à différents moments pour Varuna mais aussi pour l'étoile. En effet, bien que la position de UCAC3 233089504 soit fixe, les perturbations atmosphériques confèrent à son photocentre un mouvement parasite («seing»).

A partir de là, j'ai écrit un code (PosTNO.F90, cf. Annexes) dans le but : (1) de mesurer la différence angulaire à chaque observation entre la position observée de Varuna et la position observée de l'étoile, et (2) de mesurer la différence angulaire prévue aux moments de chaque observation entre les éphémérides de Varuna et la position fixe de l'étoile (cf. section 6.1). Les éphémérides utilisées sont celles du JPL obtenues sur le site <http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>, et les résultats générés par le code sont exprimés en arcsec.

Après avoir généré ces résultats, j'ai utilisé un code déjà existant de Mr Sicardy permettant de déterminer l'offset à appliquer afin que les données observées pour le TNO correspondent au mieux à ces éphémérides. Pour cela, le programme utilise un algorithme afin de déterminer l'offset qui minimise les écarts entre les observations et l'éphéméride. Voici un exemple de résultat obtenu après ce premier traitement (les autres sont en annexe) :

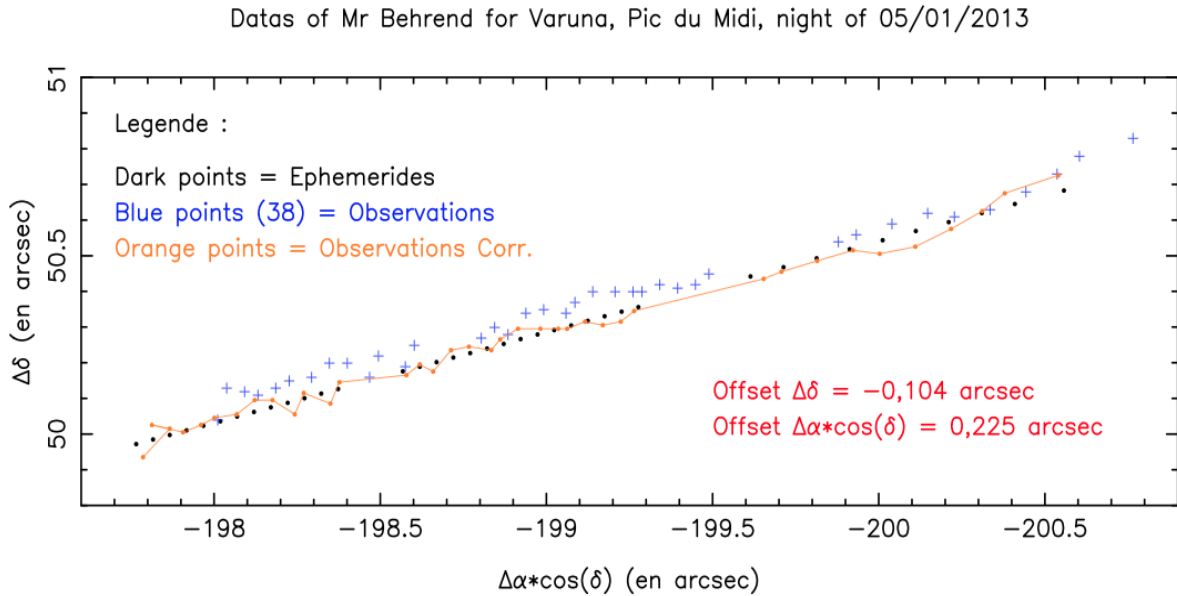


FIGURE 6.2 – Représentation graphique du résultat obtenu suite au traitement des mesures de Mr Behrend du 5 Janvier. Les points oranges correspondent aux points bleus (données observées) auxquels on a appliqué les deux offsets obtenus afin de correspondre aux éphémérides du JPL (en noir).

Connaissant la distance à laquelle Varuna se trouvait de la Terre ($D_{T,V} \approx 42,67$ UA), j'ai donc pu passer d'un décalage angulaire en arcsec à un décalage kilométrique projeté à la distance de Varuna. En effet, par définition :

$$Arcsec = \left(\frac{1}{3600} \right)^\circ \quad (6.1)$$

Or, en sachant que $1 \text{ UA} \approx 149597871 \text{ km}$, la projection p (en km) d'une arcseconde à n'importe quelle distance D de la Terre se calcule grâce à la formule suivante :

$$p = \tan \left(\frac{1}{3600} \right) \times \frac{D}{UA} \quad (6.2)$$

Dans notre cas, avec $D = D_{T,V} \approx 42,67$ UA, on obtient : $p \approx 30947 \text{ km/arcsec}$. Ainsi, en multipliant les différents offset obtenus (cf. Annexes) par le coefficient p , on va obtenir le décalage kilométrique qu'il existe au niveau de l'orbite de Varuna entre la position éphéméride de son centre et la position réelle, observée, de celui-ci.

6.3.2 Détermination des temps d'immersion et d'émergence

Après avoir calculé l'offset kilométrique pour chaque jeu de données, la seconde partie de mon travail a consisté en la détermination des temps d'immersion et d'émergence (cf. partie 4.3.2) pour les données de Shiga et d'Hiroshima.

En considérant les paramètres suivants :

- la vitesse «d'impact», $v = 26$ km/s
- le rayon apparent de l'étoile si elle se trouvait à 42,67 UA, $R_{\text{Star}} = 0,2$ km
- l'écart-type des données (Hiroshima), $\sigma_{\text{Hiroshima}} = 0,1575$
- la transmission, $T_r = 0$ (on considère donc que Varuna est un corps opaque)
- le nombre de points à fitter, $N_{\text{fit}} = 80$
- la diffraction théorique de Fresnel est étudiée sur 1 seconde avec un pas de 0,02 sec

On obtient, pour Hiroshima, un T_{imm} à 20h24m42,77s ($T_{\text{imm}} = 73482,77\text{s}$) et un T_{eme} à 20h24m55,66s ($T_{\text{eme}} = 73495,66\text{s}$). Les $\chi^2_{\text{réduit}}$ pour T_{imm} et T_{eme} sont satisfaisants.

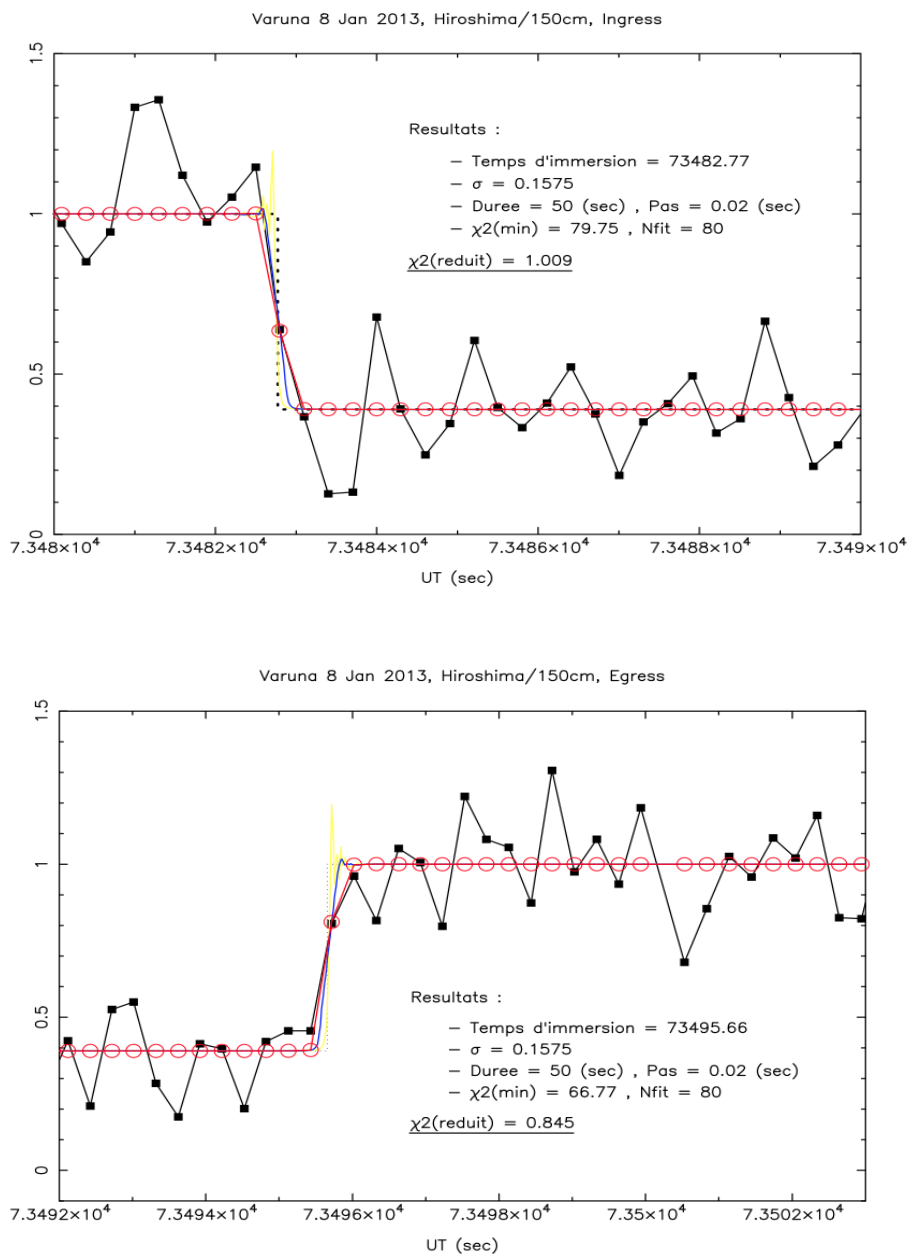


FIGURE 6.3 – En haut : Représentation graphique pour le fit de l'immersion de Varuna où on trouve $T_{\text{imm}} = 73482,77\text{s}$. En bas : Même graphique mais obtenu pour l'émergence de où on a $T_{\text{eme}} = 73495,66\text{s}$. Le code couleur est le même que celui de la figure (4.7)

Comme expliqué dans la partie 4.3.2, les barres d'erreurs ont pu être estimées toujours grâce à ce test du χ^2 . Dans ce cas précis, elles ont pu être obtenues graphiquement, après avoir créé la courbe $\chi^2 = f(t)$ avec t appartenant aux intervalles $[T_{imm} - 0,5 ; T_{imm} + 0,5]$ et $[T_{eme} - 0,5 ; T_{eme} + 0,5]$ et variant avec un pas de 0,02s.

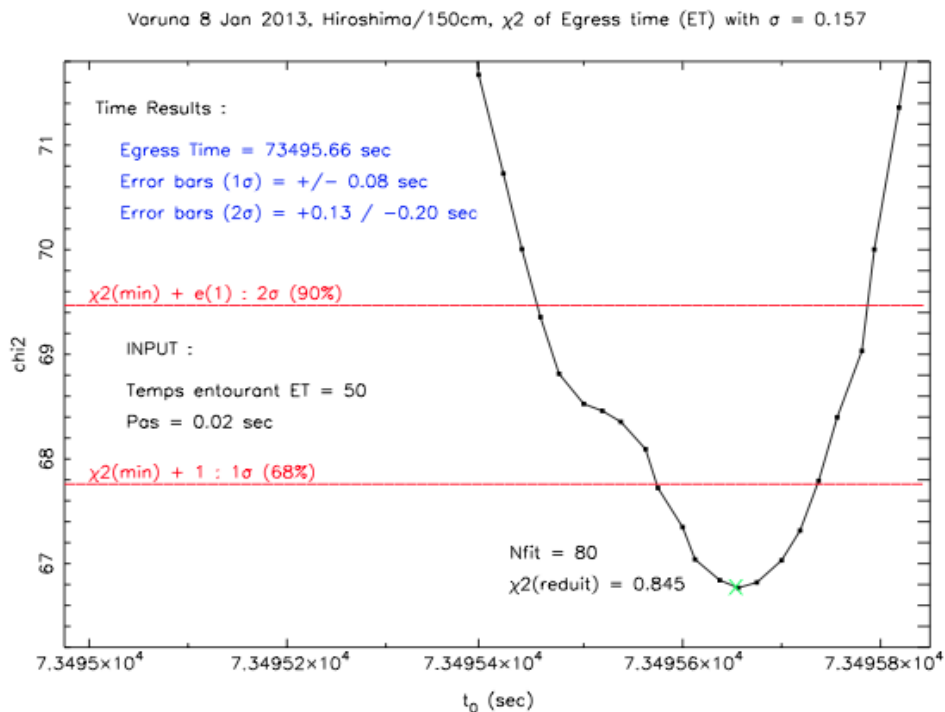
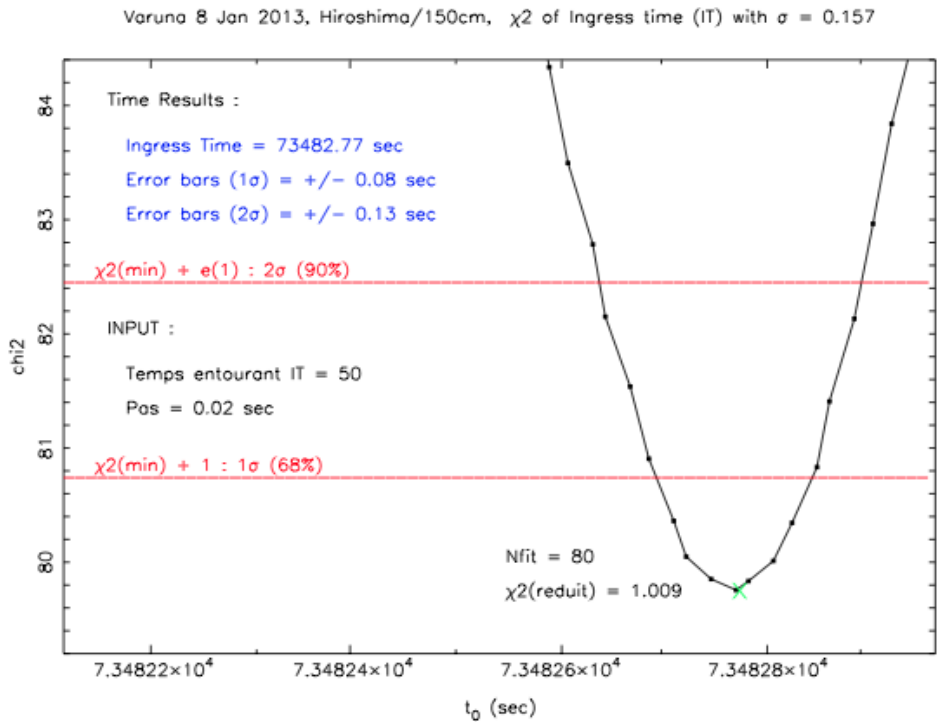


FIGURE 6.4 — *En haut* : Courbe $\chi^2 = f(t)$ autour de $T_{imm} = 73482,77s$. Par exemple, à 2σ (90% de certitude), les barres d'erreurs sur T_{imm} sont de $\pm 0,13s$. *En bas* : Même chose mais appliqué à $T_{eme} = 73495,66s$. Dans ce cas-ci, les barres d'erreurs ne sont pas symétriques pour une certitude à 2σ : $+0,13s$ et $-0,20s$, soit $0,33s$ d'incertitude sur T_{eme} .

Ces graphiques ont aussi été construits pour les données de Shiga (cf. Annexes).

6.4 Résultat global, discussions et perspectives

Les résultats obtenus sont synthétisés dans la figure (6.5). Dans ses grandes lignes, celui-ci a pour but de calculer la distance (en km) entre l'endroit où l'événement a été observé par rapport à l'endroit où l'occultation aurait dû être visible (d'après les éphémérides) à l'heure précise de l'observation. Ainsi, comme pour les photocentres, à chaque temps obtenu correspond un offset (X;Y).

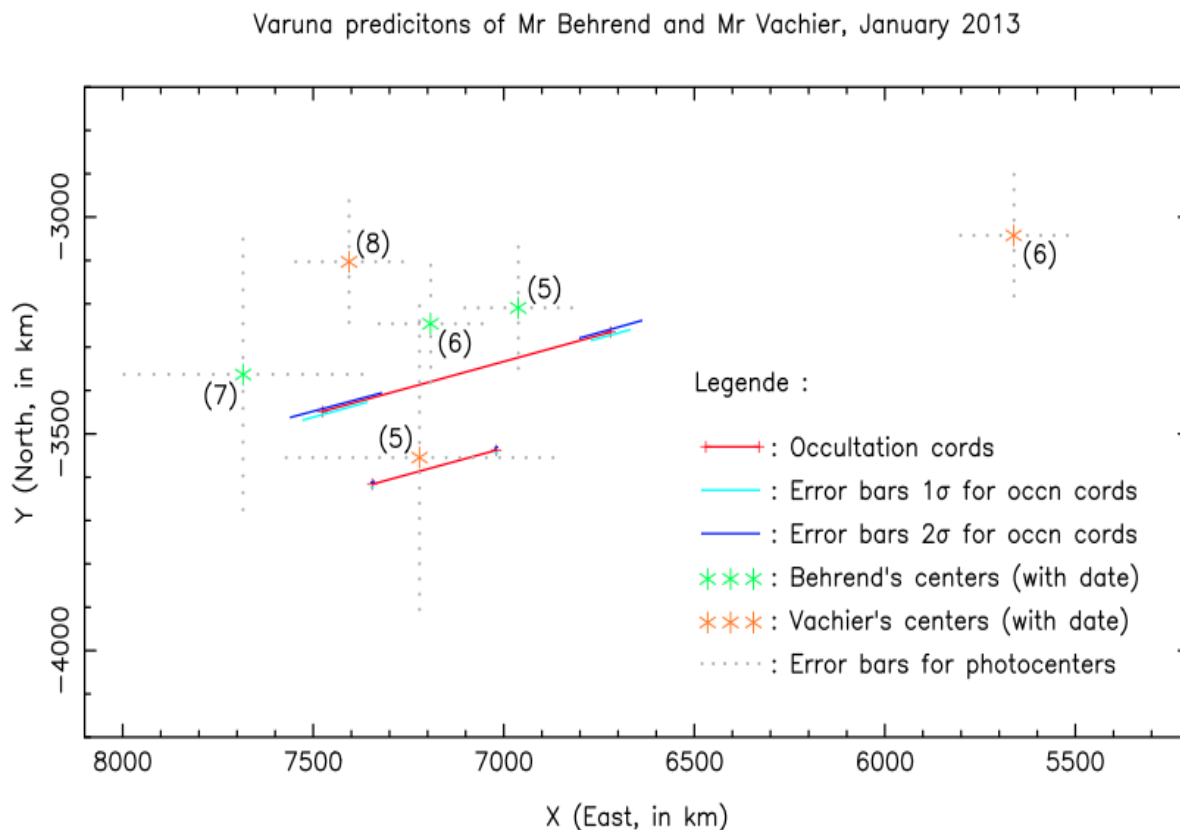


FIGURE 6.5 — *Axe des abscisses* : Offset (en km) en direction de l'Est. *Axe des ordonnées* : Offset (en km) en direction du Nord. Ce graphique rassemble les résultats préliminaires obtenus. Les étoiles correspondent aux offset obtenus pour les différents jeu de données (date entre parenthèse). Les droites rouges correspondent aux cordes d'occultations, avec en bleu clair et foncé leurs barres d'erreurs à 1σ et 2σ respectivement.

Avant tout, il est à signaler que les résultats obtenus pour les données de Mr Camargo ne sont pas représentés sur le graphique car ceux-ci sont incompatibles par rapport à ce qui était attendu et aux résultats présentés ci-dessus (cf. Annexes)¹. Je me suis concentré exclusivement sur les données de Mr Behrend et de Mr Vachier.

Ensuite, en ce qui concerne les cordes d'occultations, on remarque aisément qu'il existe de larges incertitudes sur la corde d'occultation obtenue à Shiga. Cela s'explique par un «cycle» très long (10s) pour chaque observation dans lequel se trouve une période de Dead Time de 1,65s (cf. Table 6.1). Par contre, comme vu précédemment, les barres d'erreurs sont très petites à Hiroshima pour T_{imm} et T_{eme} .

Enfin, concernant la position des photocentres, on observe une dispersion problématique des photocentres dans la figure (6.5). Il existe des explications possibles à ces problèmes :

1. Ce désaccord est probablement dû à un catalogue trop petit utilisé par Mr Camargo

1. Le code de Mr Vachier est encore en développement, alors que celui de Mr Behrend a déjà été testé depuis des années. Des erreurs systématiques peuvent encore être présentes dans le premier, alors qu'elles ont été corrigées dans le second.
2. La différence de catalogue stellaire. En fait, Mr Behrend et Mr Vachier utilisent le même catalogue (UCAC2), mais celui de Mr Behrend a été largement amélioré suite à sa participation à de nombreuses campagnes de prédiction.
3. La taille importante de certaines barres d'erreurs des photocentres s'explique simplement par un nombre faible de données. Par exemple, on peut affirmer que la grande barre d'erreur du photocentre du 7 Janvier de Mr Behrend est majoritairement causée par un nombre de mesures plus de 5 fois plus faible que pour le 6 Janvier (cf. Annexes), la barre d'erreur étant en principe proportionnelle à $N^{-1/2}$ où N est le nombre de données.

Malgré ces problèmes, les photocentres de Mr Behrend du 5 et du 6 Janvier semblent correspondre à la valeur de l'offset du centre de Varuna au moment de l'événement. En attendant que Mr Behrend nous fournisse ses réductions pour le 8 Janvier, il a été décidé d'essayer de fitter une ellipse avec un centre $(x;y)$ à mi chemin entre ses photocentres du 5 et du 6. Le code utilisé pour cela est un code préexistant de Mr Sicardy utilisant «l'algorithme du simplex». Et voilà le résultat obtenu :

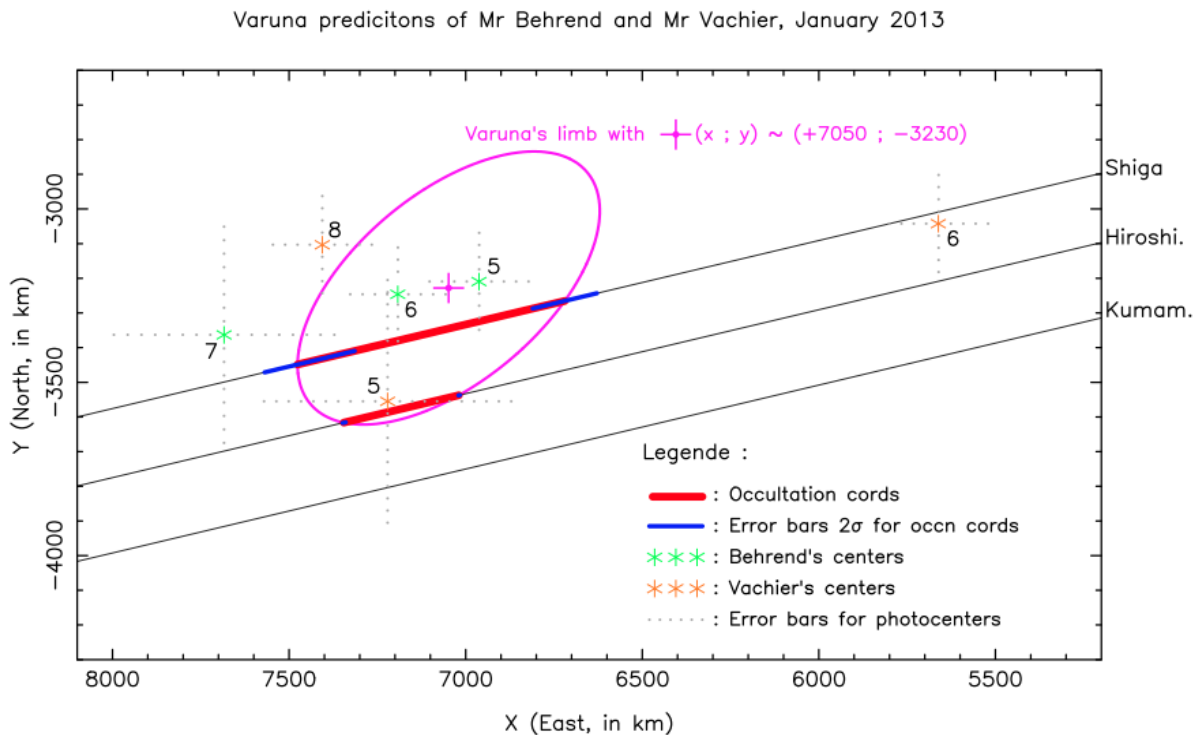


FIGURE 6.6 – Même graphique que la Figure 6.6 avec, en plus, le rajout d'une ellipse ayant un centre entre les photocentres du 5 et du 6 Janvier de Mr Behrend : $(X ; Y) \approx (+7050\text{km} ; -3230\text{km})$.

Avec un centre fixe $(X ; Y) \approx (+7050\text{km} ; -3230\text{km})$, le fit pour l'ellipse est parfaitement cohérent avec les différents T_{imm} et T_{eme} .

Avant de conclure, il reste cependant à confirmer que le photocentre du 8 Janvier de Mr Behrend est bien cohérent avec ce modèle, mais aussi à vérifier que le rapport de la surface visible de Varuna de notre modèle et de celui de 2010 est semblable au rapport entre le flux lumineux reçu durant cette occultation et le flux lumineux reçu lors de l'occultation de 2010.

Chapitre 7

Chariklo (Centaure)

7.1 Généralités

Durant mon stage, un certain nombre d'occultation observée, dont celle de Chariklo (nommé originellement 1997CU₂₆) qui est survenue le 3 Juin.

Chariklo ne fait pas partie de la catégorie des TNOs car il n'orbite pas au-delà de Neptune. En effet, avec une distance orbitale allant de 13,08 UA à 18,66 UA, Chariklo orbite entre Saturne et Uranus. De ce fait, Chariklo appartient à la classe des Centaures ; les Centaures sont des petits corps dont l'orbite se situe dans le domaine des géantes gazeuses, à savoir entre Neptune et Jupiter.

Le premier Centaure à avoir été identifié est Chiron (1977), mais c'est bien Chariklo, découvert 20 ans plus tard, qui est le plus grand représentant actuellement connu de cette catégorie d'objet avec un diamètre estimé autour de $260,9^{+16,4}_{-16,0}$ km pour un albédo de géométrie dans le visible $p_v = 5,63^{+0,76}_{-0,65}$ (Stansberry et al. 2007).

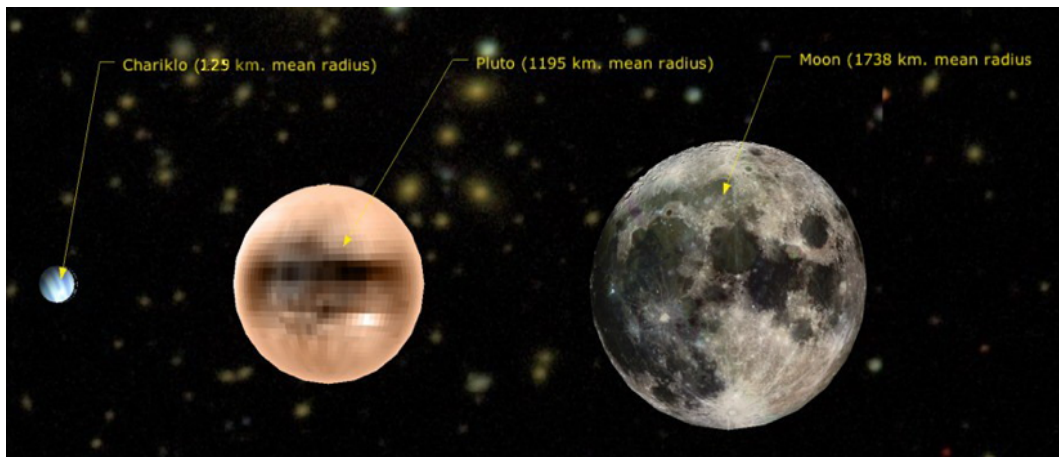


FIGURE 7.1 – Taille de Chariklo comparativement à la Lune et à Pluton.

Les premières études faites à son sujet n'ont pas été en mesure de déterminer son axe et sa période de rotation (Peixinho et al. 2001). Concernant sa surface, la présence d'une quantité de glace d'eau non négligeable est compatible avec le spectre obtenu dans le domaine du proche infrarouge (Groussin et al. 2004). Ensuite, une étude menée par Belskaya et al. en 2010 a mis en évidence baisse progressive de la magnitude absolue au cours du temps (Figure 7.2). Pour finir, aucune activité cométaire n'a pour le moment été observée même si une telle activité peut être attendue au moment du périhélie (Guilbert-Lepoutre 2011 ; Fornasier et al. 2013).

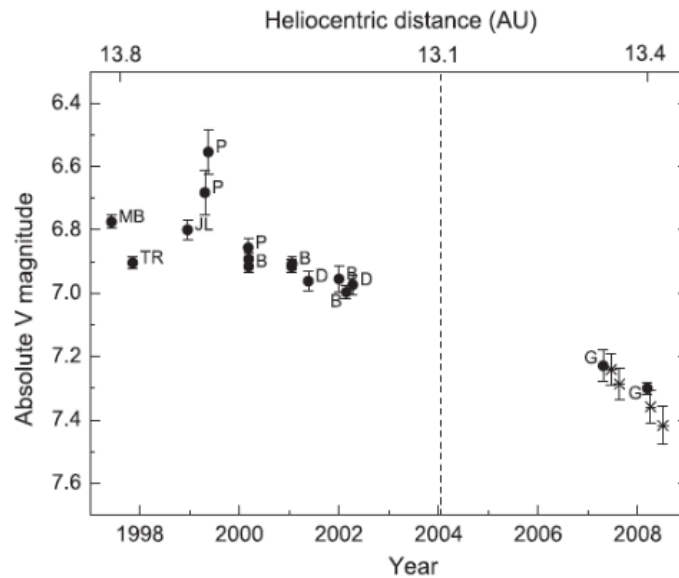


FIGURE 7.2 – Magnitude absolue de Chariklo en fonction du temps. Le périhélie est représenté par la droite en pointillé à 13,1 UA. Les données représentées par des points noirs font références à des mesures effectués par différents auteurs (MB - **McBride**, JL - **Jewitt, Luu**, TR - **Tegler, Romanishin**, P - **Peixinho**, B - **Bauer**, D - **Dotto**, G - **Guilbert**), tandis que les étoiles correspondent aux magnitudes absolues mesurées d’après les mesures polarimétriques effectuées par Belskaya.

7.2 L’occultation

7.2.1 Astrométrie et prévision

L’étude préliminaire sur la position réelle de l’étoile a abouti aux valeurs suivantes :

$$\begin{cases} \alpha = 254.02703167^\circ \\ \delta = -40.52505694^\circ \end{cases}$$

À partir de là, des études astrométriques visant à déterminer l’offset ont pu débuter. Les dernières études avant l’événement prévoient l’occultation observable depuis le sud du Brésil et le Chili. Une vingtaine d’observatoire ont ainsi été alerté (Figure 7.3).

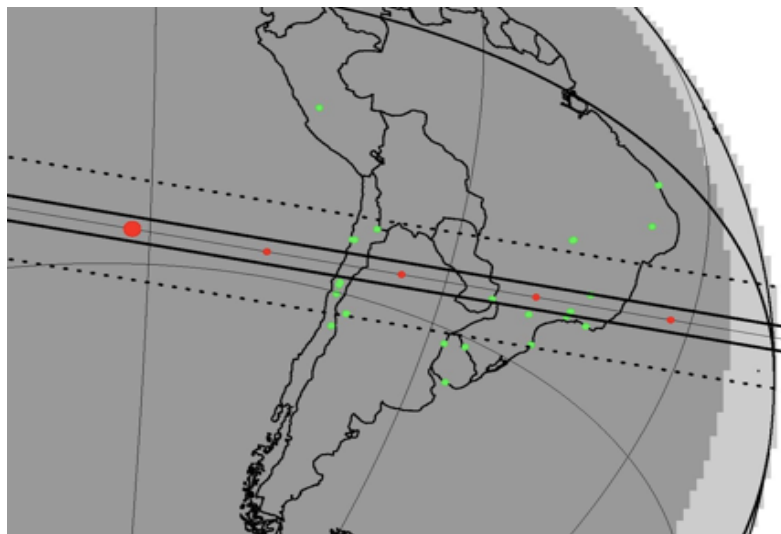


FIGURE 7.3 – Carte de prédiction de l’occultation. Les observatoires participant à la campagne sont représentés en vert. L’intervalle entre les deux épais traits plein noir correspond à la zone où il était prévu d’observer l’événement. L’incertitude sur cette zone est représentée par les pointillés.

7.2.2 Observation et instruments

Finalement, l'événement a été observé un peu plus au sud que ce qui était prévu. Mais cette déviation par rapport à ce qui était prévu s'est révélée très bénéfique, car l'occultation a ainsi pu être observée par 3 observatoires professionnels basés au Chili (Figure 7.5) ! Du Nord vers le Sud, ces observatoires sont celui de (1) La Silla (deux télescopes mobilisés : TRAPPIST et Danish), (2) Cerro Tololo (téléscope PROMPT), et (3) Cerro Pachon (téléscope SOAR).

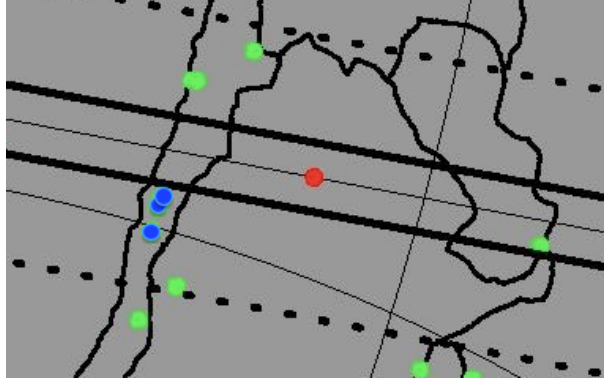


FIGURE 7.4 – Zoom sur la carte de prédiction de l'occultation. Les 3 points bleus correspondent (de bas en haut) aux observatoires de La Silla, Cerro Tololo et Cerro Pachon.

7.3 Les résultats

Observer une occultation stellaire par un corps si petit étant déjà un résultat remarquable en soit, obtenir trois cordes d'occultations pour un tel objet est absolument exceptionnel et constitue une première mondiale. Je me suis donc attelé au traitement d'une partie de ces données dès qu'elles m'ont été transmises, à savoir le 3 Juin.

7.3.1 Des événements «secondaires»...

Très rapidement, après une première réduction de données, on a remarqué l'existence de points dont le flux lumineux était anormalement faible par rapport à ce qui était attendu. En effet, après avoir normalisé à 1 le flux lumineux hors occultation, certains de ces points sont apparus avec des valeurs déviant de 3σ voire bien plus. Souvent, mais ce n'est pas tout le temps le cas (cf. Annexes), on observe ces points avant comme après l'occultation : ils «entourent» en quelque sorte l'événement principal.

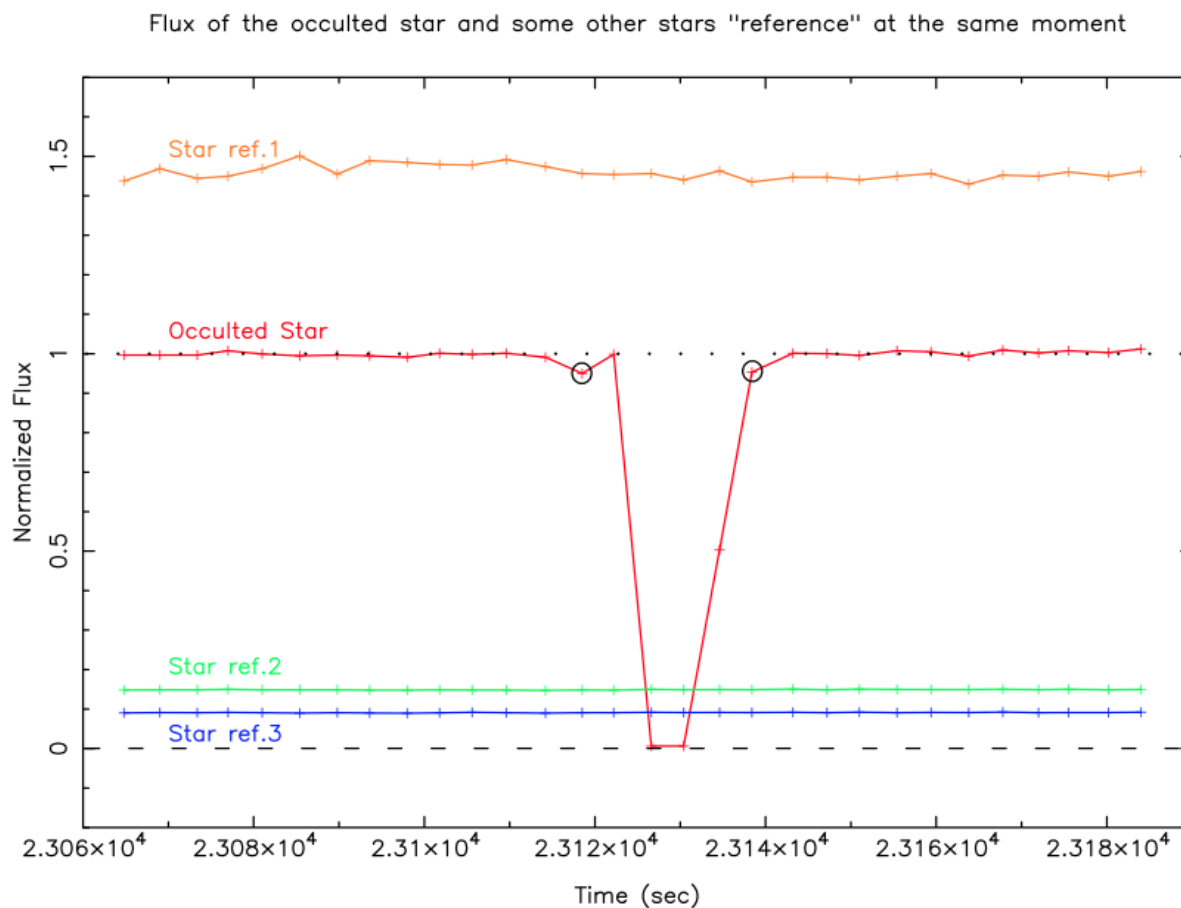


FIGURE 7.5 – Exemple du flux lumineux observé, en l'occurrence par le télescope SOAR. Chaque point représente un flux lumineux mesuré sur un temps d'intégration, en l'occurrence 3s dans ce cas (cf. Annexes). Chaque point est placé au milieu de ce temps d'intégration. Les deux points encadrés correspondent à ces événements secondaires. Dans les deux cas, avec un flux normalisé ≈ 0.93 et un $\sigma_{\text{hors occultation}} \approx 0.06$, ces deux points ont un écart supérieur à 10σ .

Ces événements secondaires ont encore plus attirés notre attention quand d'autres équipes ont confirmé en avoir aussi observé à des endroits où l'occultation n'a cependant pas pu être détectée. Surtout, fait remarquable, ces événements semblent intervenir de manière à peu près symétrique (évidemment dans le cas où on obtient deux de ces événements) par rapport à l'occultation si celle-ci avait réellement eu lieu.

Voici un tableau dans lequel sont recensés l'ensemble des événements secondaire qui ont pour le moment été identifiés à partir des courbes de flux (celles dont je dispose se trouvent dans les annexes) :

Nom de l'observatoire	Temps
Foz do Iguacú (Brésil) : → 2 évènements	$T_1 = 23057,2s \pm 2s$ $T_2 = 23074,2s \pm 2s$
Ponta Grossa (Brésil) : → 1 évènement	$T_1 = 23038,5s \pm 2,5s$
La Silla, deux télescopes (Chili) : - Danish : → 2 évènements : - TRAPPIST : → non concluant ($T_{\text{Exposition}}$ trop grand)...	$T_1 = 23122,8s \pm 0,1s$ $T_2 = 23142,1s \pm 0,1s$
Cerro Tololo, télescope PROMPT (Chili) : → 1 évènement	$T_1 = 23120,0s \pm 1,0s$
Cerro Pachon, télescope SOAR (Chili) : → 2 évènements	$T_1 = 23117,1s \pm 1,5s$ $T_2 = 23138,4s \pm 1,5s$
Bosque Alegre (Argentine) : → 1 évènement	$T_1 = 23109,5s \pm 1,5s$
Santa Martina : → 2 évènements	$T_1 = 23121,6s \pm 0,5s$ $T_2 = 23131,6s \pm 0,5s$

7.3.2 Détermination de T_{imm} et $T_{\text{émé}}$

De la même manière que pour Varuna, j'ai cherché à caractériser les temps d'immersion et d'émersion pour chacun des observatoires ayant détecté l'occultation. Voici un tableau récapitulatif de l'ensemble des résultats obtenus :

Nom de l'observatoire	Temps d'immersion T_{imm} (3σ)	Temps d'émersion $T_{\text{émé}}$ (3σ)
La Silla : - Télescope Danish : - Télescope TRAPPIST :	$T_{\text{imm}} = 23129,48s \pm 0,02s$ $T_{\text{imm}} = 23127,91s \pm 0,08s$	$T_{\text{émé}} = 23134,81s \pm 0,02s$ $T_{\text{émé}} = 23133,17s \pm 0,08s$
Cerro Tololo : - Télescope PROMPT :	$T_{\text{imm}} = 23124,84s \pm 0,03s$	$T_{\text{émé}} = 23135,41s \pm 0,02s$
Cerro Pachon : - Télescope SOAR	$T_{\text{imm}} = 23124,40s \pm 0,60s$ (DT)	$T_{\text{émé}} = 23134,60s \pm 0,13s$

Sauf dans le cas de l'immersion au SOAR qui a eu lieu durant le Dead Time, tous les temps obtenus sont très bien contraints.

Toutefois, il existe un décalage qui n'a pas lieu d'être entre les données du télescope Danish et du télescope TRAPPIST à La Silla. En effet, ces deux télescopes étant séparés d'une petite centaine de mètre seulement, la différence systématique d'environ 1,6 seconde n'a absolument pas lieu d'être. Une étude est en cours afin de déterminer d'où provient cette erreur ; d'après les dernières informations, il semblerait que le télescope Danish ne soit pas parfaitement synchronisé sur le temps universel.

7.4 Résultat général, déductions et discussions

Comme pour Varuna, l'ensemble des résultats obtenus précédemment ont été intégré au code de Mr Sicardy. Au matin du jeudi 20 Juin, voici ce qu'il en est concernant le fit de la limbe de Chariklo ainsi que la position des événements secondaires :

Chariklo 3 June 2013, 3 positive chords (bottom to top): SOAR, CTIO, La Silla

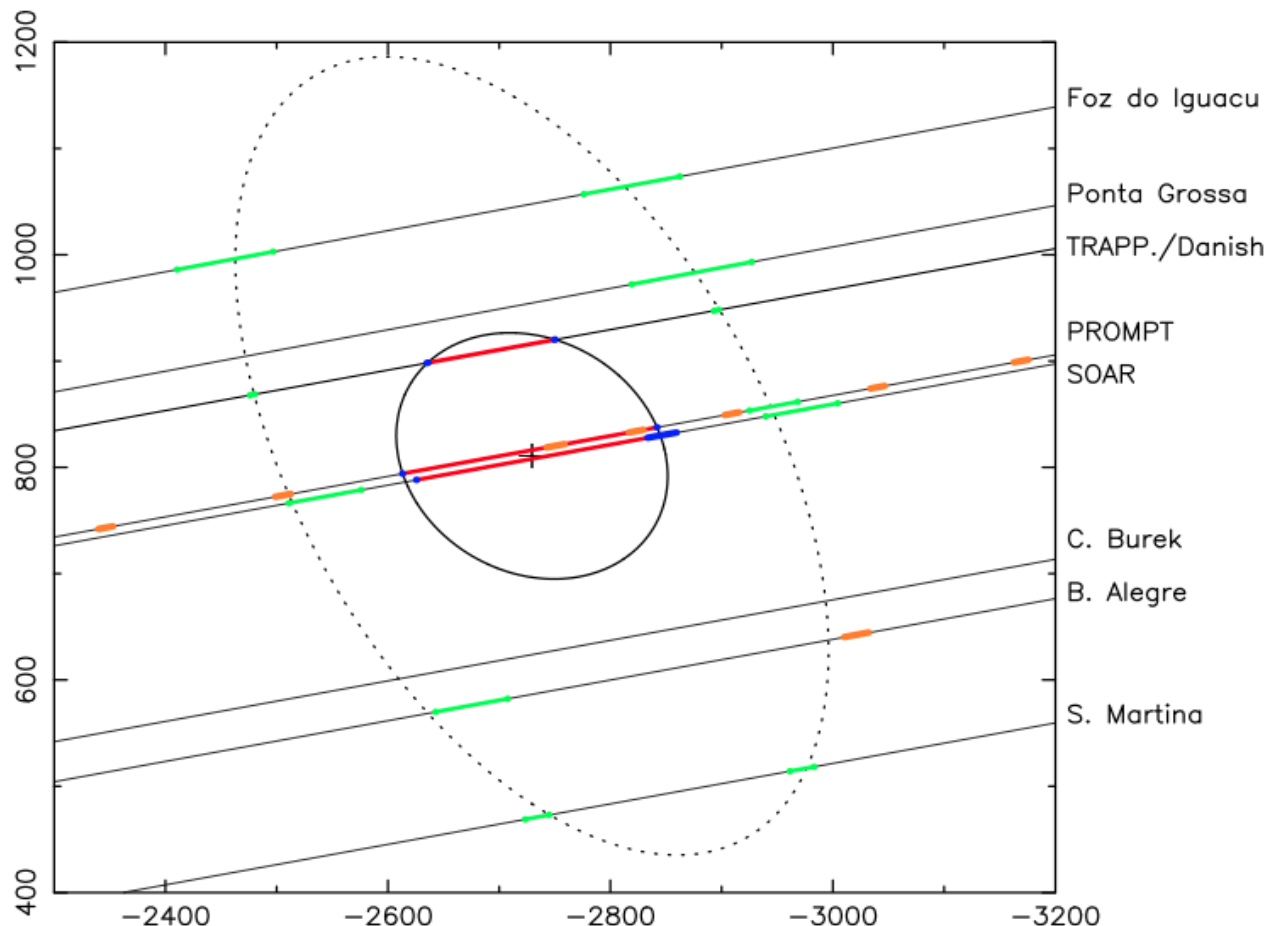


FIGURE 7.6 — *Axe des abscisses* : Offset (en km) en direction de l'Est. *Axe des ordonnées* : Offset (en km) en direction du Nord. *En rouge* : les cordes d'occultations. *En bleu* : les barres d'erreur sur les cordes d'occultations. *En vert* : événements secondaires et barres d'erreur associées. *En orange* : la couverture spatiale sans information à cause des différents Dead Time. *Trait plein noir épais* : meilleure ellipse obtenue pour la forme et les dimensions de Chariklo. *Croix noire* : Centre de l'ellipse obtenue. *En pointillés* : Ellipse centrée sur le centre de Chariklo et passant par les événements secondaires.

Remarque importante : En aucun cas ce graphique ne doit être pris pour un résultat définitif. Il reste une bonne partie du traitement à faire, notamment concernant les données de *C. Burek* et *Ponta Grossa*. De plus, une étude afin de vérifier la synchronisation temporelle de chaque station est en cours. Enfin, il manque encore à ce graphique un certain nombre de Dead Time.

7.4.1 Forme et dimension

La forme obtenue pour Chariklo est une ellipse avec un demi-grand axe $a \approx 130\text{km}$ et un demi-petit axe $b \approx 105\text{km}$. Cela nous donne donc un aplatissement $\epsilon \approx 0,19$. Ces dimensions sont cohérentes, bien qu'un peu plus petites, que celles obtenues par les mesures dans le proche infrarouge (Stansbery et al. 2007).

Toutefois, on remarque que le temps d'émergence au SOAR ne colle pas parfaitement à ce qui est attendu. En effet, un décalage de 6-7km est observé par rapport à notre modèle. Dans ce sens, une étude afin de savoir si le SOAR était parfaitement synchronisé est en cours. Néanmoins, même si aucune erreur de synchronisation venait à être révélé, il ne serait pas vraiment choquant d'avoir de grandes variations topographiques sur un objet de cette taille. En effet, notamment sur des objets de plus grandes tailles comme Vesta ou Hypérion, ces gros astéroïdes sont suffisamment déformés pour observer ce genre de variation topographique supérieure au kilomètre. Après avoir levé le voile sur cette incertitude, une estimation de l'albédo géométrique dans le visible p_v sera effectuée. À première vue, nous devrions avoir $p_v \approx 0,06-0,07$.

7.4.2 Un anneau ?

Aussi surprenant que cela puisse paraître, le modèle le plus cohérent afin d'expliquer les différents événements secondaires est celui de l'anneau.

Deux autres hypothèses ont été évoquées avant d'arriver à ce modèle :

1. L'hypothèse d'une occultation d'un système d'étoiles binaire (voire ternaire) est la première à avoir été évoquée. Toutefois, cette hypothèse a été très rapidement écarté pour une raison : au moment de l'occultation, le flux lumineux ne pourrait alors pas tomber à 0 (ou presque) comme on l'observe ici. En effet, en supposant que les événements secondaires soient dûs à l'occultation d'une petite étoile compagnon, le flux lumineux au moment de l'occultation serait égal à celui de Chariklo sommé à celui de cette étoile compagnon. En aucun cas nous aurions un flux proche de 0 comme c'est le cas ici.
2. L'hypothèse d'une activité cométaire ou de «jets» est la seconde hypothèse qui a été exploré. En effet, la première occultation stellaire par un Centaure, à savoir Chiron, a mis en évidence la présence d'une activité à sa surface (Elliot et al. 1995). Un destin similaire a donc été pensé pour Chariklo, mais cette hypothèse se heurte toutefois à deux problèmes majeurs : (1) comment imaginer que le flux lumineux décroisse brutalement avant de réaugmenter (tout aussi brusquement) alors que l'on se rapproche toujours du «noyau» cométaire, et (2) comment imaginer que la signature d'une activité cométaire soit autant contrainte temporellement et spatialement (pas plus de 0,3s d'après les données La Silla - Danish -) alors que la coma d'une comète est connue pour s'étaler sur plus de millions de kilomètres.

Finalement, le modèle de l'anneau formé suite à une collision est celui qui correspond au mieux aux observations. Cette hypothèse prend d'autant plus de poids que :

1. Le centre de l'anneau est compatible avec le centre de Chariklo.
2. Le fit de la figure (7.6) fournit un rayon de 410km pour l'anneau et de 130km pour Chariklo. En considérant un matériau de même densité que Chariklo, la limite de Roche se trouverait à $2,44 R_{\text{Chariklo}} = 320\text{km}$ du centre de masse de Chariklo. Pour une densité constante, l'anneau se trouve donc 30% au-delà de cette limite. Cependant, celle-ci peut être augmentée si le satellite est moins dense que le corps central.
3. L'anneau semble se trouver à peu près dans le plan équatorial de notre modèle pour Chariklo, ce qui est évidemment la solution la plus stable.

4. D'après des simulations effectuées par Mme Françoise Roques du LESIA, le modèle d'un anneau de 2,5km de large et opaque à plus de 90% colle parfaitement avec l'ensemble des mesures du flux lumineux pour les événements secondaires.
5. La variation de l'inclinaison de l'anneau par rapport à la Terre pourrait être à l'origine de la variation de la magnitude absolue mise en évidence par Belskaya.
6. La présence probable de satellites «bergers» à l'instar de ce qui est observé pour les anneaux de Saturne (Figure 7.7)

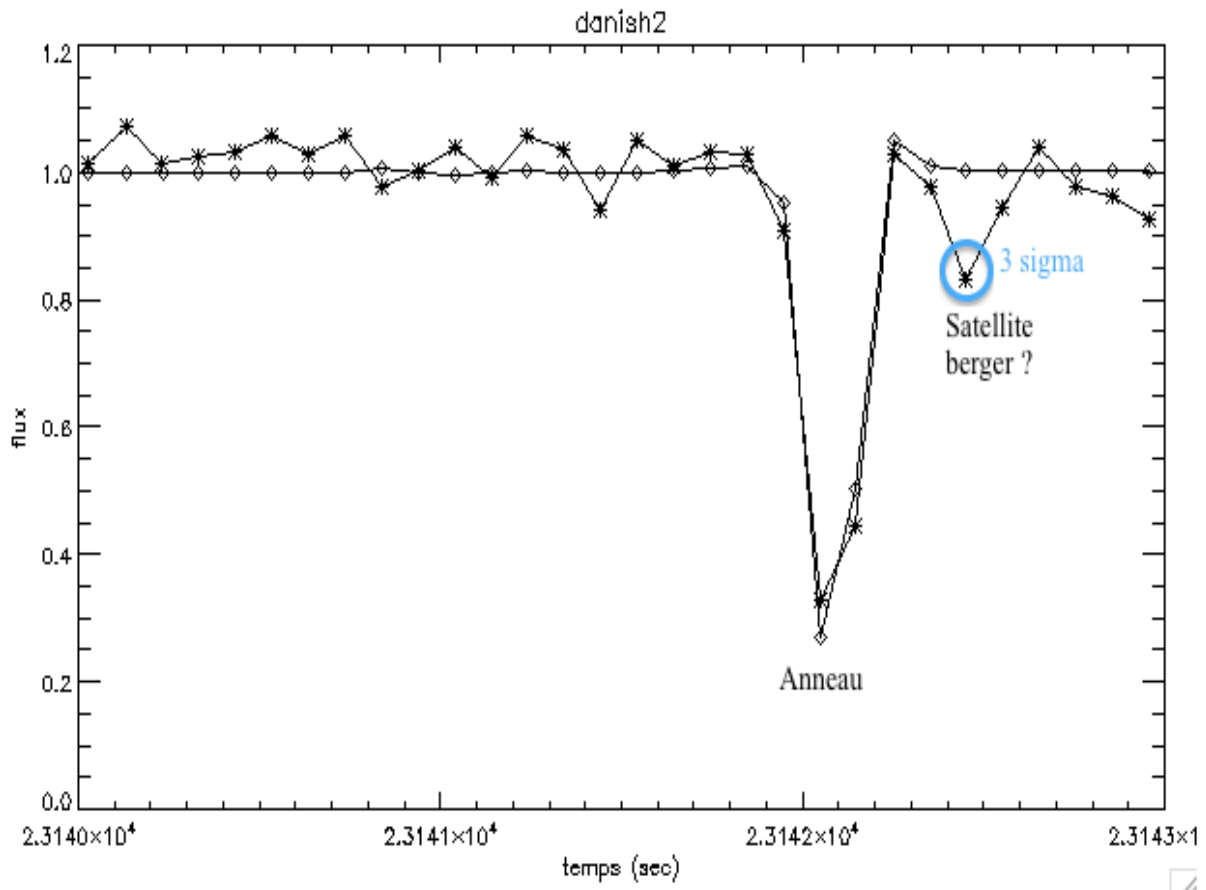


FIGURE 7.7 – Variation du flux lumineux enregistrés par le télescope Danish autour du second événement secondaire, c'est à dire celui post-occultation. Les "étoiles" correspondent aux données et les "diamants" sont le profil synthétique prenant en compte l'effet de la diffraction. Juste à l'extérieur de l'anneau, un point enregistre une baisse du flux de plus de 3σ . Il pourrait potentiellement s'agir d'un petit satellite berger (± 1 km de diamètre) qui maintiendrait ainsi l'anneau dans une orbite légèrement interne à la sienne.

Bien que ce modèle colle très bien aux observations, il soulève aussi de nombreuses questions, et notamment l'origine et la stabilité d'un tel anneau.

L'observation d'un anneau autour d'un corps si petit est une première mondiale et laisse évidemment songeur. En attendant, comme dit au début de cette partie, le traitement et l'analyse des données sont toujours en cours car tous les secrets que cette occultation stellaire n'ont pas encore été révélés.

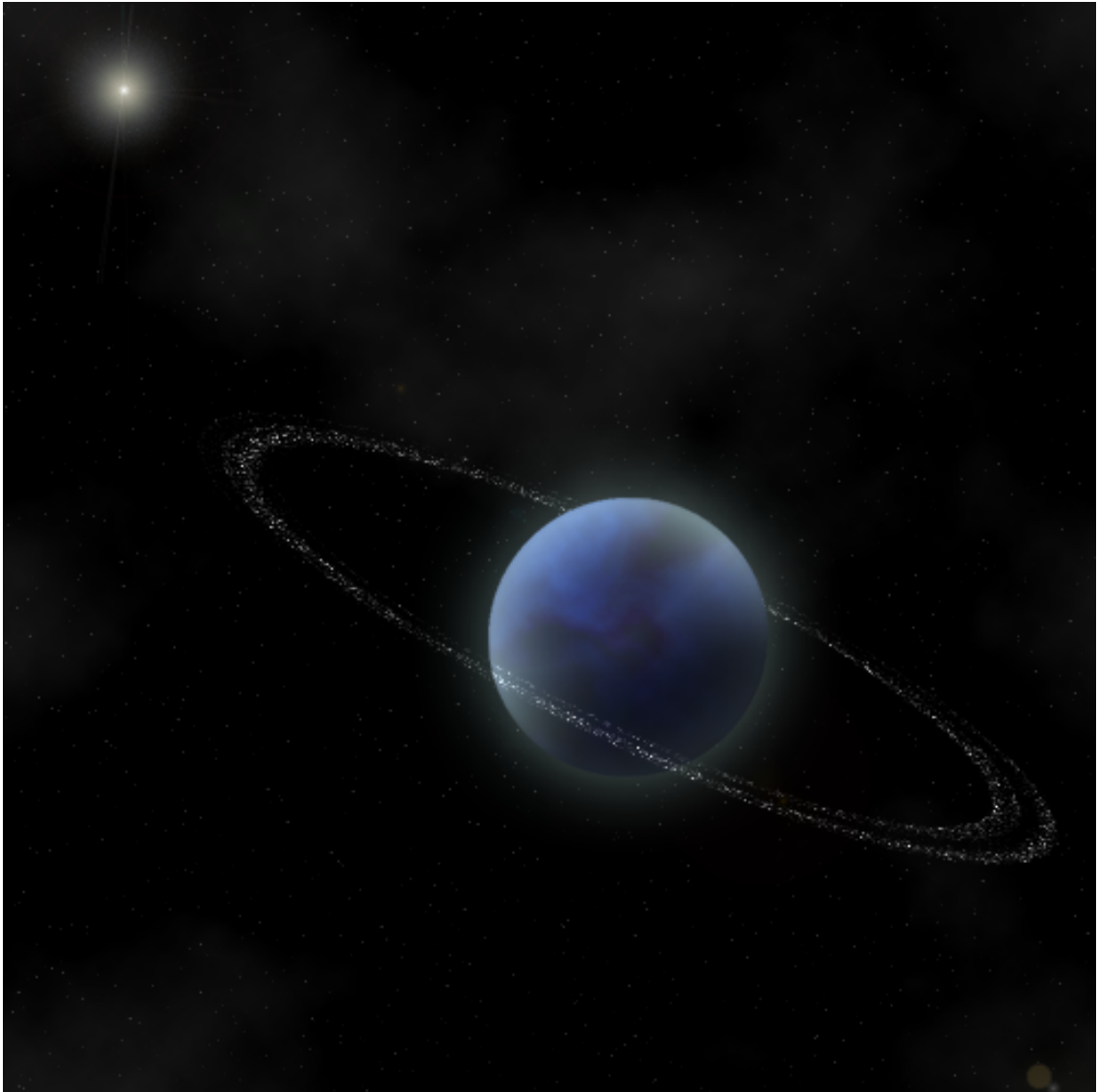


FIGURE 7.8 – Vue d'artiste de Chariklo par la post-doctorante Lucie Maquet (LESIA)

Chapitre 8

Conclusion

À travers les exemples de Varuna et Chariklo, nous avons pu mesurer la puissance et l'efficacité de la méthode des occultations stellaires. Basée sur des concepts géométriques assez simples, cette méthode est, à l'heure qu'il est, celle qui permet d'obtenir avec la plus grande précision les dimensions des petits corps telluriques comme les Centaures et les TNOs. Cette information primordiale va ainsi permettre de remonter directement à différents paramètres physiques comme l'albédo et parfois même la masse et la densité. Les TNOs étant des corps restés à un état quasi primitif, ce genre d'informations constituent une véritable mine d'or afin de comprendre les premiers instants et l'évolution qu'a connu notre système solaire.

Outre le fait d'être en mesure d'obtenir de manière directe les dimensions d'un objet avec une précision kilométrique, cette méthode est capable de mettre en évidence des «détails» que même les plus grands télescopes ne sont pas en mesure de voir. Par exemple, dans le cas de Chariklo, même avec une précision angulaire de l'ordre de 5-10 mas le VLT n'est pas en mesure de résoudre l'anneau de Chariklo avec la même efficacité que ce qui a été fait par occultation stellaire. Un autre exemple (que je n'ai malheureusement pas eu le temps d'aborder ici), consiste à détecter la présence d'une atmosphère autour d'un de ces objets, et même d'être en mesure d'apporter des informations sur la pression atmosphérique engendrée par celle-ci comme ce fut le cas pour Pluton et Eris dernièrement.

Les TNOs sont des objets nombreux et très divers, aussi bien d'un point de vue de leur dimensions, que de leurs paramètres orbitaux et de leur nature chimique. Cette diversité est synonyme d'avenir et doit nous pousser à les étudier d'avantage. Dans cette optique, la mission NASA *New Horizons* visitera le système Pluton-Charon en Juillet 2015 et devrait alors nous apporter un nombre considérable d'informations. En attendant, de nombreuses occultations par Pluton ont été observées (dont la dernière en Mai dernier avec 7 cordes d'occultations) et vont être observées, ce qui devrait nous permettre d'affiner nos modèles avant l'arrivée de la sonde.

Annexes

I.) Les TNOs les plus connus

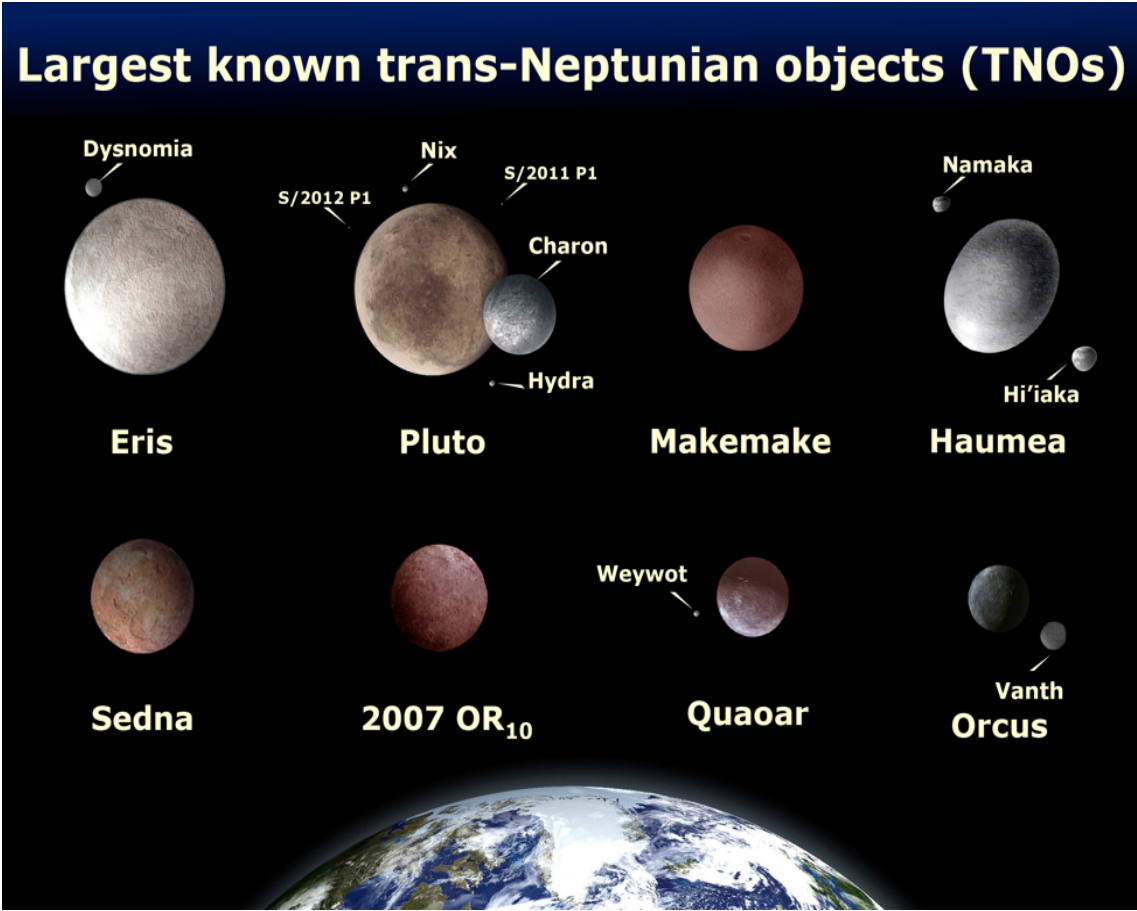


FIGURE 8.1 – Les plus gros TNOs connus (Dernière mise à jour : Mai 2013)

II.) Varuna

A) Offsets

1) Code informatique principal

! Code qui calcule la position relative d'un TNO par rapport à une étoile occultée (ou pas), et qui compare le résultat à la différence que l'on attend suite aux éphémérides du TNO et à la position fixe (catalogue) de l'étoile.

! Auteur: Nicolas Ligier
! Date : Mercredi 08/04/2013

PROGRAM PosTNO_relative
IMPLICIT NONE

```
integer , parameter :: nmax = 10000
double precision , parameter :: n = 3600 , toler = 1.e-7
double precision :: a, d, pi
double precision, dimension(nmax) :: B, C
double precision, dimension(nmax) :: ObsTNO_RightAsc, ObsTNO_Decl
double precision, dimension(nmax) :: EpheTNO_RightAsc, EpheTNO_Decl
double precision, dimension(nmax) :: ObsStar_RightAsc, ObsStar_Decl
double precision, dimension(nmax) :: ObsTNO_JulianDate, ObsStar_JulianDate, EpheTNO_JulianDate
double precision, dimension(nmax) :: ObsDiff_RightAsc, ObsDiff_Decl
double precision, dimension(nmax) :: EpheDiff_RightAsc, EpheDiff_Decl
integer :: i, ii, q, iObs, iEphe, iStar
character*100 Obs, Ephe, ObsStar, Star
```

```
pi = dacos(-1.d0)
```

```
ii = 0
```

```
1 continue
```

```
ii = ii+1
```

```
print *, " "
```

```
print *, " "
print *, " --- Jeu de données Numéro :", ii
print *, " "
```

```
iObs = 0
```

```
i = 1
```

```
write (*,*) ' Fichier avec les coordonnées observées du TNO ?'
```

```
read (*,*) Obs
```

```
print *, " ", Obs
```

```
OPEN(UNIT=20,FILE=Obs,STATUS='old',FORM='formatted')
```

```
DO WHILE (i <= nmax)
```

```
READ (20,*,err=99,end=98) ObsTNO_JulianDate(i), ObsTNO_RightAsc(i), ObsTNO_Decl(i)
```

```
i = i+1
```

```
iObs = iObs+1
```

```
99 continue
```

```
ENDDO
```

```
98 continue
```

```
CLOSE(20)
```

```
print *, " "
```

```
iEphe = 0
```

```
i = 1
```

```
write (*,*) ' Fichier avec les coordonnées éphémérides du TNO aux mêmes dates que les observations ?'
```

```
read (*,*) Ephe
```

```
print *, " ", Ephe
```

```
OPEN(UNIT=25,FILE=Ephe,STATUS='old',FORM='formatted')
```

```
DO WHILE (i <= nmax)
```

```
READ (25,*,err=97,end=96) EpheTNO_JulianDate(i), EpheTNO_RightAsc(i), EpheTNO_Decl(i)
```

```
i = i+1
```

```
iEphe = iEphe+1
```

```
97 continue
```

```
ENDDO
```

```
96 continue
```

```
CLOSE(25)
```

```

print *, "          "

iStar = 0
i = 1
write (*,*) "      Coordonnées observées pour l'étoile ?"
read (*,*) ObsStar
print *, "          ", ObsStar
OPEN(UNIT=30,FILE=ObsStar,STATUS='old',FORM='formatted')
DO WHILE (i <= nmax)
  READ (30,*,err=95,end=94) ObsStar_JulianDate(i), ObsStar_RightAsc(i), ObsStar_Decl(i)
  i = i+1
  iStar = iStar+1
95 continue
ENDDO
94 continue
CLOSE(30)

print *, "          "

i = 1
write (*,*) "      Coordonnées (a,d) fixées pour l'étoile ?"
read (*,*) Star
print *, "          ", Star
OPEN(UNIT=35,FILE=Star,STATUS='old',FORM='formatted')
READ (35,*,err=93,end=93) a, d
93 continue
CLOSE(35)

print *, "          "

! ----- Vérifications ----- !

IF (iObs.ne.iEphe) then

    print *, "Problème !"
    print *, "Différences en nombre de données pour le jeu de données N",i," --> Entre données Ephe et Obs du TNO"
    print *, iEphe, iObs
    print *, "          "
!   stop
ENDIF

IF (iObs.ne.iStar) then
    print *, "Problème !"
    print *, "Différences en nombre de données pour le jeu de données N",i," --> Entre étoile et TNO"
    print *, iStar, iObs
    print *, "          "
!   stop
ENDIF

i = 1
DO WHILE (i <= iObs)
  C(i) = abs(ObsStar_JulianDate(i) - ObsTNO_JulianDate(i))
  B(i) = abs(ObsTNO_JulianDate(i) - EpheTNO_JulianDate(i))
  if (C(i) > toler) then
    print *, "Problème !"
    print *, i,"eme donnée : différence de date entre 2 données pour jeu de données N",i," --> Etoile vs TNO"
!   stop
  endif
  if (B(i) > toler) then
    print *, "Problème !"
    print *, i,"eme donnée : différence de date entre 2 données pour jeu de données N",i
    print *, "          --> TNO Ephe vs TNO Obs"
!   stop
  endif
  i = i+1
ENDDO

! ----- Fin des vérifications ----- !

```

```

i=1
print *, "          "
print *, "          "
print *, "Différences entre les coordonnées (a,d) OBSERVEES du TNO et les coordonnées observées de l'étoile :"

```

```

print *, "          "
write(*,*) "          Faut-il lire des fichiers d'une autre date ?"
read(*,*) q
if (q.eq.1) go to 1
if (q.eq.0) go to 2

```

2 continue

END PROGRAM PosTNO_relative

2) Graphiques Offset Mr Behrend

Datas of Mr Behrend for Varuna, Pic du Midi, night of 06/01/2013

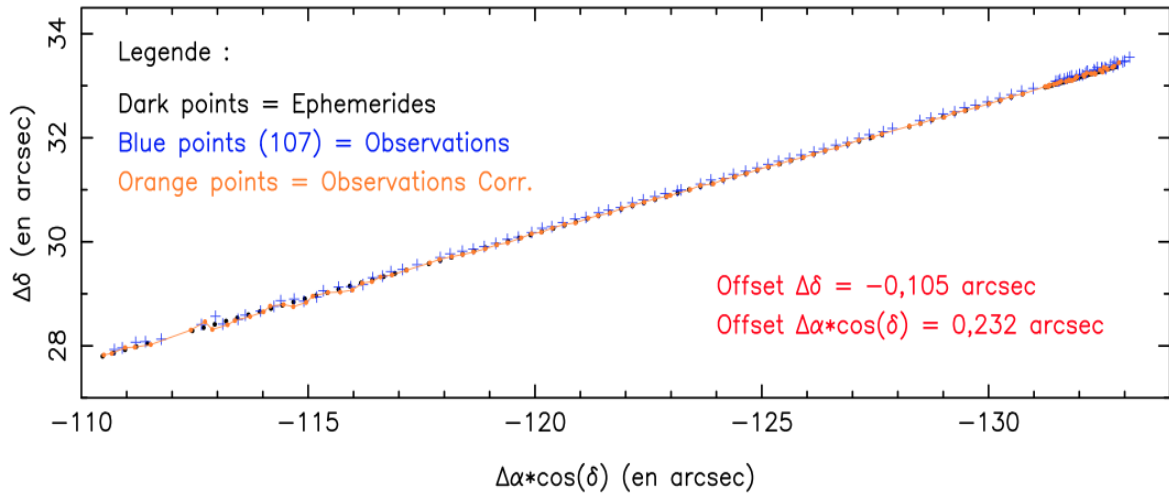


FIGURE 8.2 – Mesure de l'offset à appliquer aux données du 6 Janvier de Mr Behrend

Datas of Mr Behrend for Varuna, Pic du Midi, night of 07/01/2013

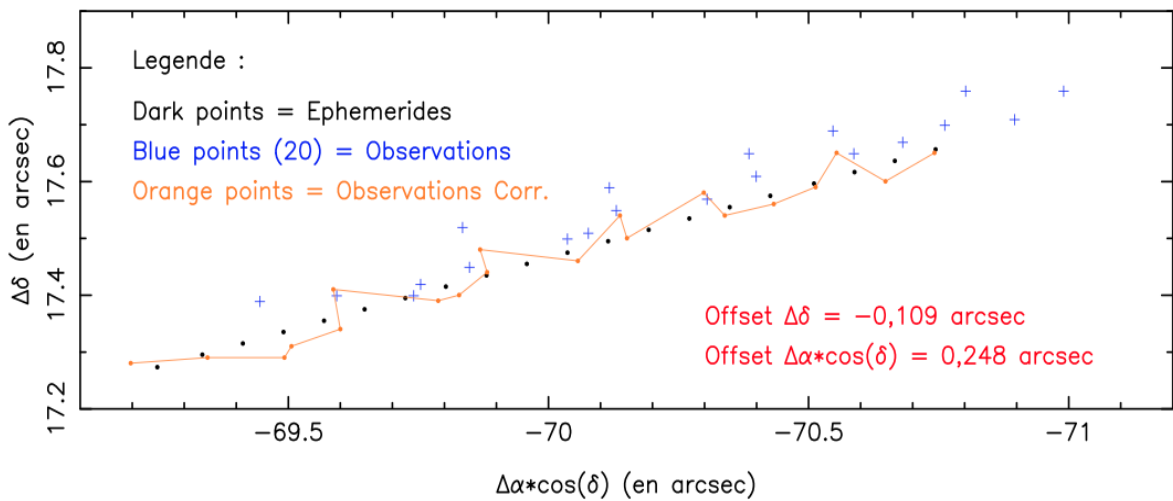


FIGURE 8.3 – Mesure de l'offset à appliquer aux données du 7 Janvier de Mr Behrend

3) Graphiques Offset Mr Vachier

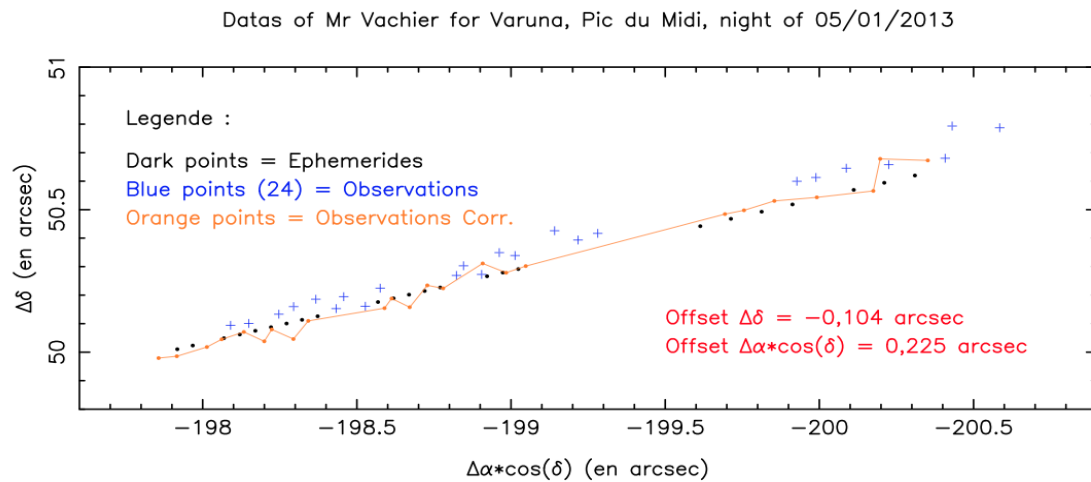


FIGURE 8.4 – Mesure de l'offset à appliquer aux données du 5 Janvier de Mr Vachier

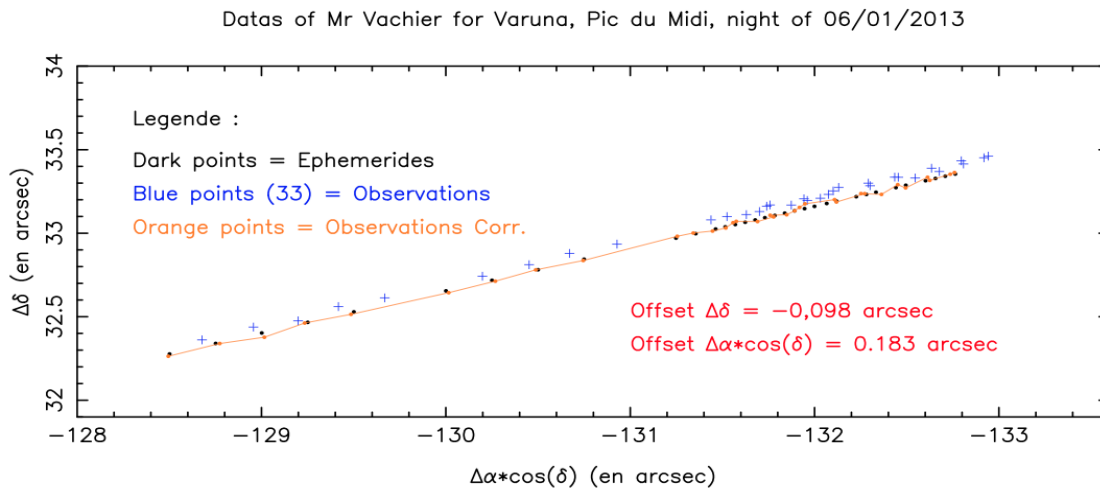


FIGURE 8.5 – Mesure de l'offset à appliquer aux données du 6 Janvier de Mr Vachier

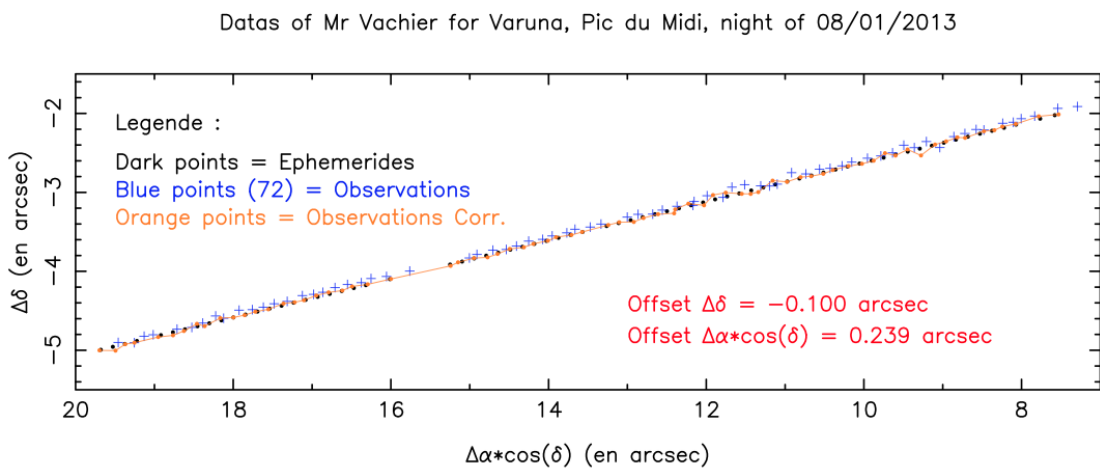


FIGURE 8.6 – Mesure de l'offset à appliquer aux données du 8 Janvier de Mr Vachier

4) Graphiques Offset Mr Camargo

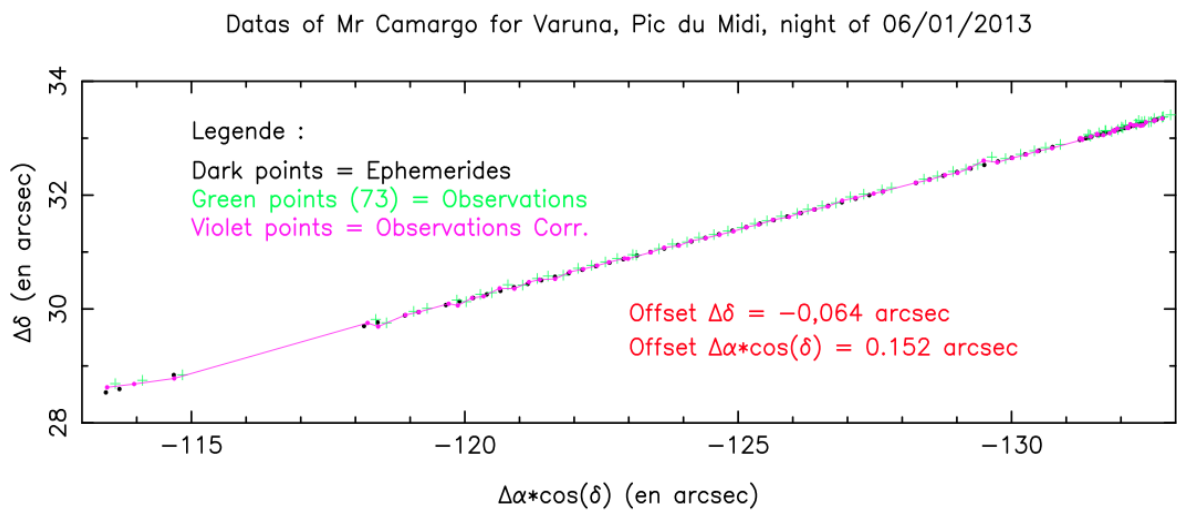


FIGURE 8.7 – Mesure de l'offset à appliquer aux données du 6 Janvier de Mr Camargo

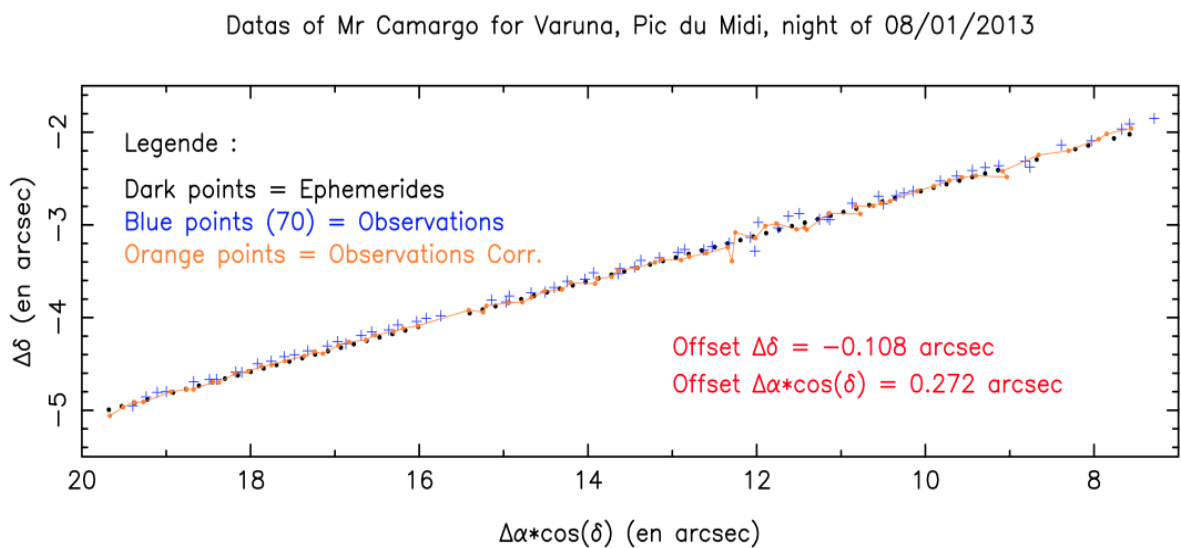


FIGURE 8.8 – Mesure de l'offset à appliquer aux données du 8 Janvier de Mr Camargo

B) Fit des temps de Shiga

1) Fit T_{imm} avec sa courbe de χ^2

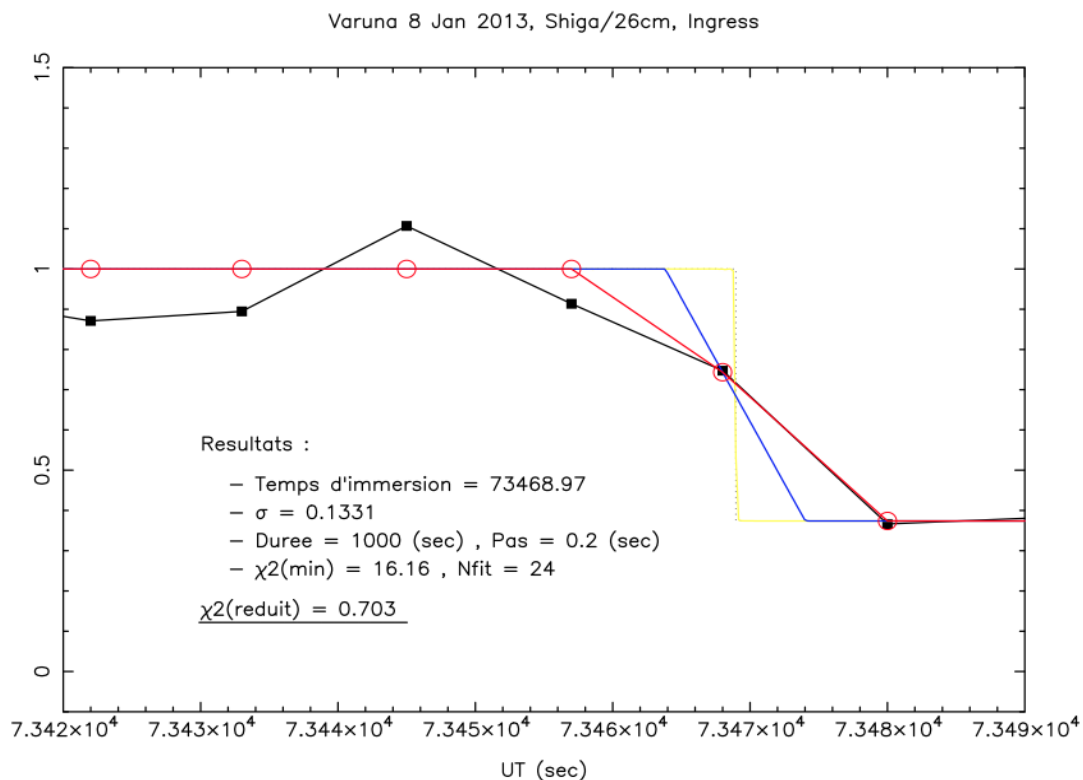


FIGURE 8.9 – Meilleur fit pour T_{imm} à Shiga

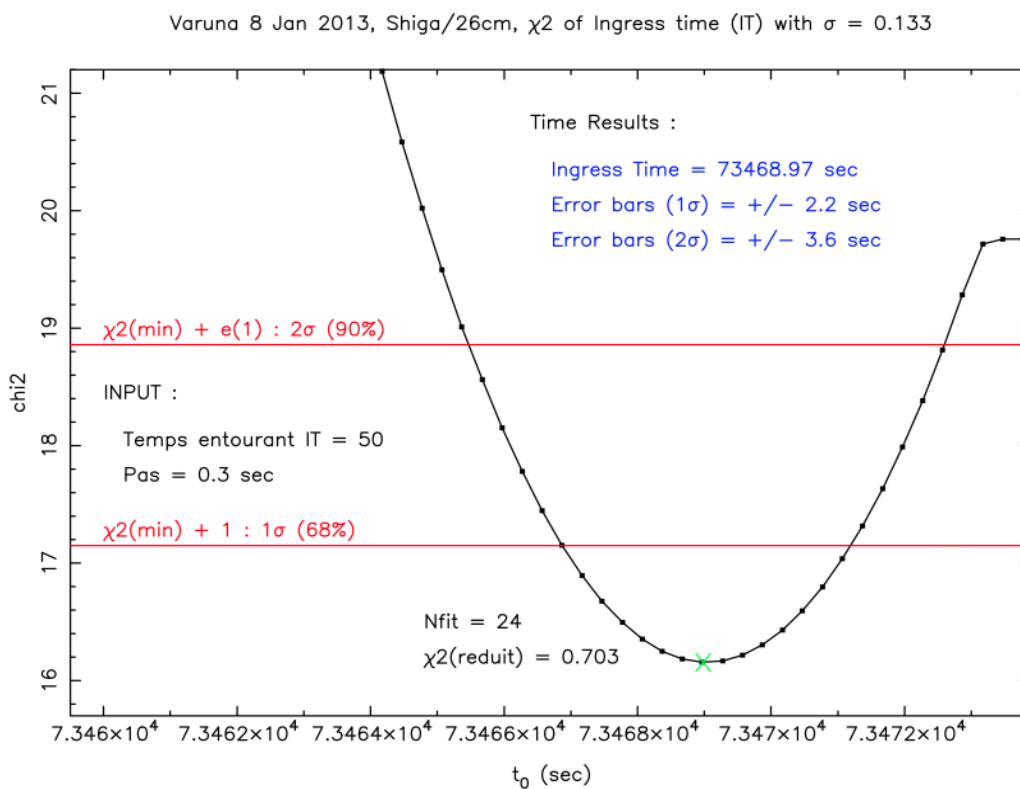


FIGURE 8.10 – Courbe du χ^2 associée à ce T_{imm} de Shiga

2) Fit T_{eme} avec sa courbe de χ^2

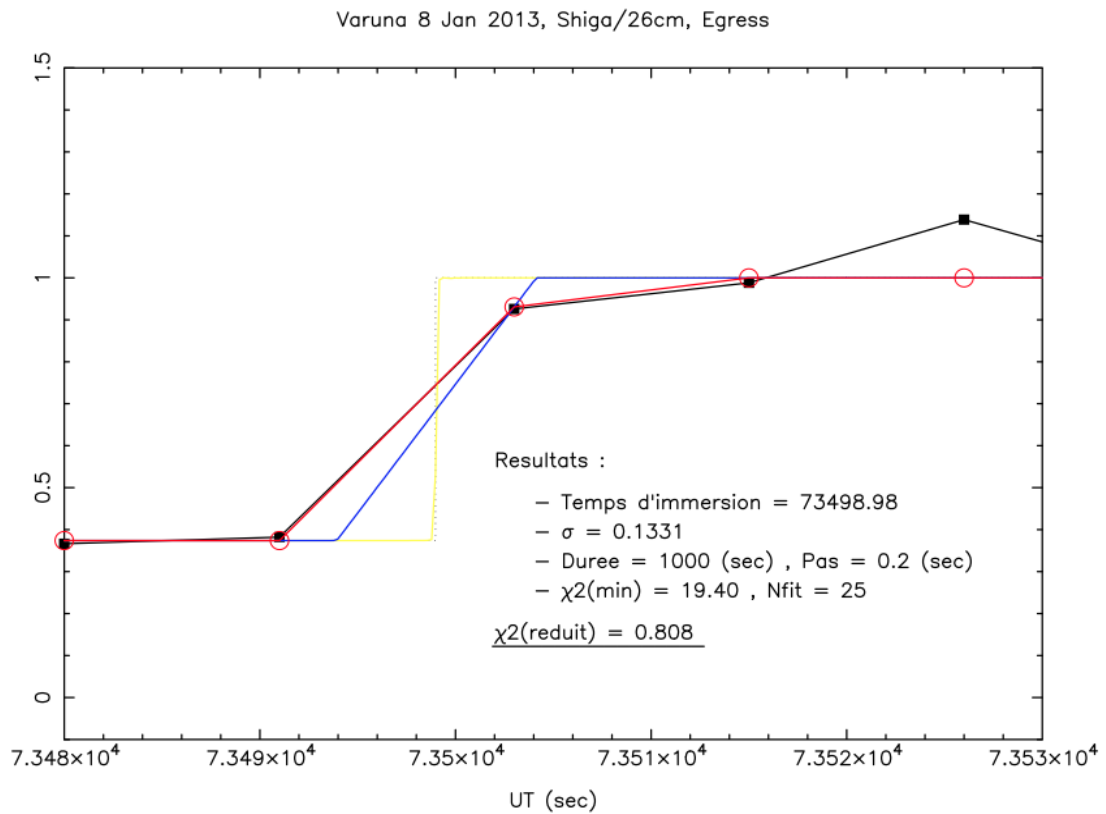


FIGURE 8.11 – Meilleur fit pour T_{eme} à Shiga

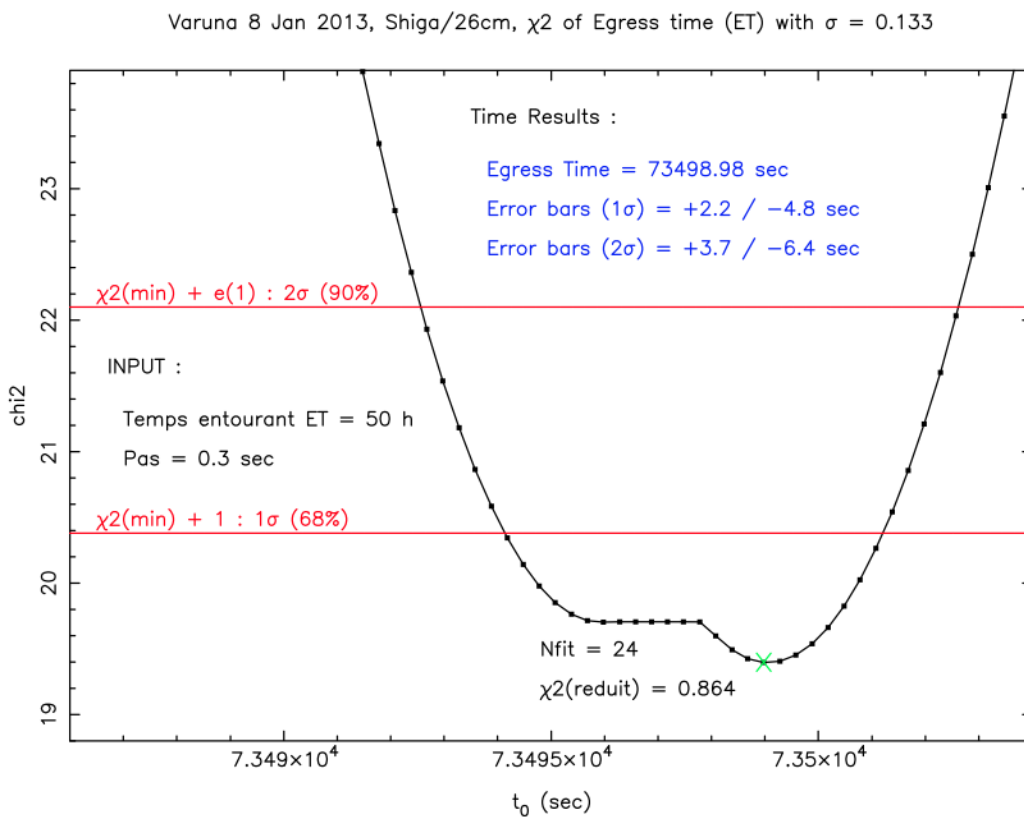


FIGURE 8.12 – Courbe du χ^2 associée à ce T_{eme} de Shiga

III.) Chariklo

A) Journal de bord

Chariklo occultation, 3 June 2013

distance $\Delta = 2030859343.6$ km, échelle: 1 arcsec = 9845.9 km, app. magnitude: $V = 18.05$ (star $V = 12.63$ NOMAD)

Site	coordinates lat dd:mm:ss lon dd:mm:ss alt meters	telescope	camera exposure/cycle time seconds filter, binning	team
Santa Martina	??? S ??? W ???	40cm??	1.0/1.0	R. Leiva Espinoza two individual drops at 6:25:20 and 6:25:31
Cerro Pachón	30 14 16.8 S 70 44 01.35 W 2738	SOAR	3/4.2 several cycles 3.6-4.6s	R. Duffard positive, drops before and after
Cerro Tololo	30:10:03.36 S 70:48:19.01 W 2207	PROMPT 0.4m 3 telescopes	0.7/1.3	J. Pollock positive, drop before?
La Silla	29 15 21.276 S 70 44 20.184 W 2336	Danish 1.54m	Lucky Imager 0.1/0.1 ???	C. Snodgrass tbd
La Silla	29 15 16.59 S 70 44 21.82 W 2315	TRAPPIST 0.6m	4.5/5.7976456 qqc cycles 6.15-6.19s clear	E. Jehin positive, drop before ?
Bosque Alegre	31 35 54.0 S 64 32 58.7 W 1250	1.5m	??? ???	??? positive, jet at 06:25:09?

Notes: negative from ASH C. Burek, ASH2 SP Atacama.

Ponta Grossa: observations done (M. Emilio 3 jun 13), results tbd.

Uruguay: two stations, one in OALM (Los Molinos, Montevideo) and the other one with the portable telescope in OAGA (Aigua, Maldonado). Apparently negative (G. Tancredi 3 jun 13)

FIGURE 8.13 – Journal de bord.

Attention, par manque cruel de temps, celui-ci n'a pas eu l'occasion d'être mis à jour depuis le 12 juin environ... En l'occurrence, depuis sa dernière mise à jour, les données de *Foz do Iguaçu* et *Ponta Grossa* ont pu être ajoutées et traitées, et les données de *C. Burek* sont en analyse.

B) Flux lumineux observées aux différentes stations

1) Ponta Grossa

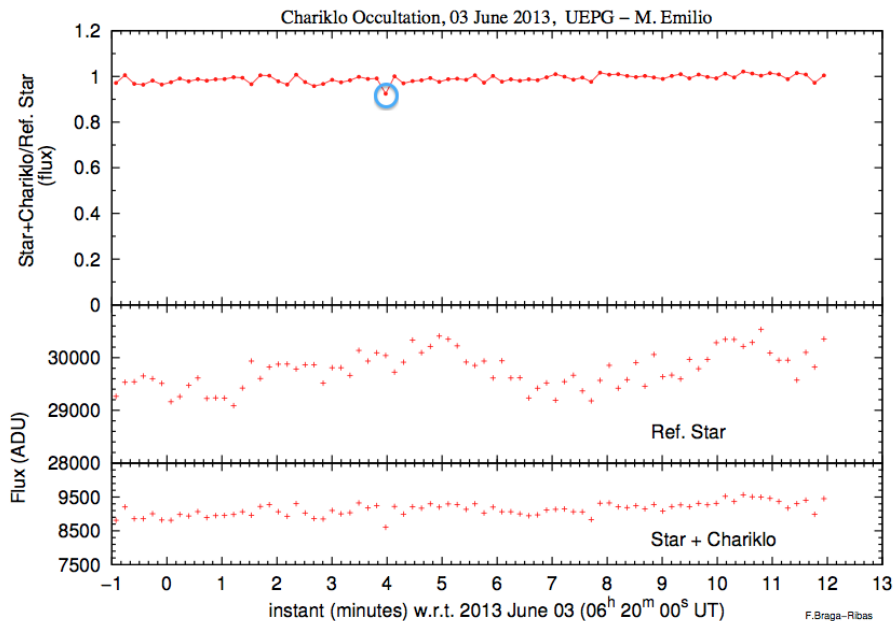


FIGURE 8.14 – Représentation graphique du flux lumineux observé à Ponta Grossa. L'événement principal n'a pas été observé. On observe qu'un seul événement secondaire et la chute du flux est faible à cause du long temps de pose (cf. Journal de bord). Le second n'a probablement pas pu être observé à cause du Dead Time.

2) TRAPPIST

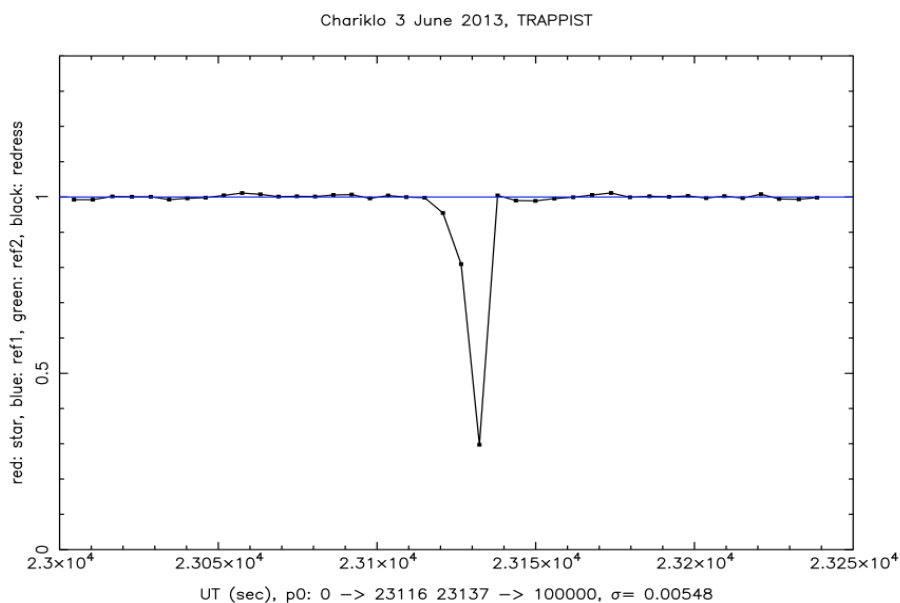


FIGURE 8.15 – Représentation graphique du flux lumineux observé à La Silla par le télescope TRAPPIST. La baisse progressive du flux lumineux associée à sa remontée brutale nous avait fait envisagé l'hypothèse de l'occultation d'un système d'étoile binaire. En effet, le temps d'intégration étant extrêmement grand (afin de réduire l'effet du Dead Time lui aussi très grand), le flux lumineux ne tombe jamais à 0 et était donc compatible avec l'hypothèse du système binaire.

3) Danish

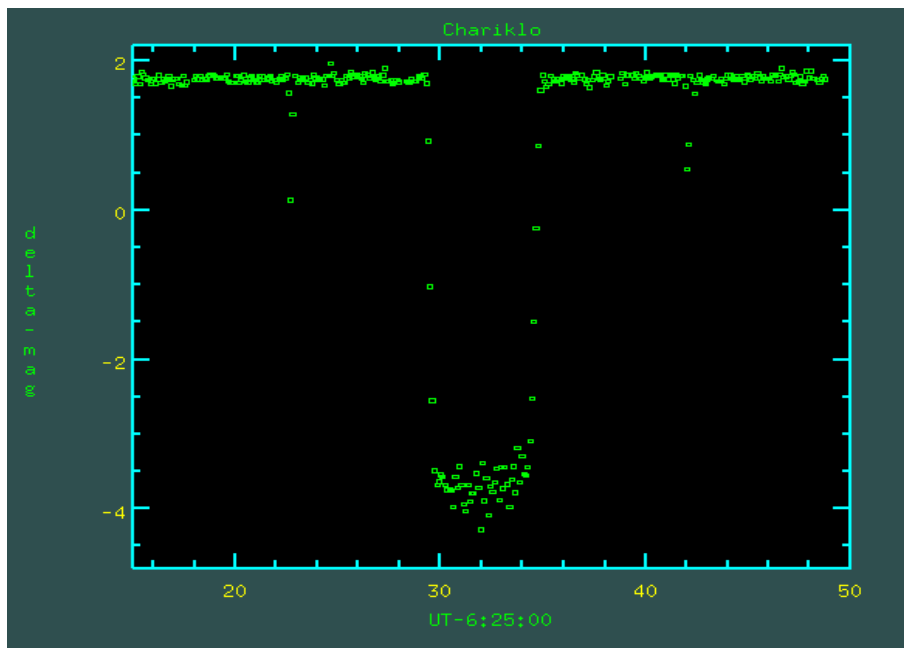


FIGURE 8.16 – Représentation graphique du flux lumineux observé à La Silla par le télescope Danish. La fréquence du pas d'intégration est de 10Hz, ce qui nous permet de très bien résoudre la chute du flux de l'événement principal ainsi que les événements secondaires ! Ce jeu de données est celui qui contraint au mieux la position de l'anneau, mais c'est aussi celui qui a permis à Mme Roques d'estimer la taille et l'opacité de l'anneau.

4) PROMPT

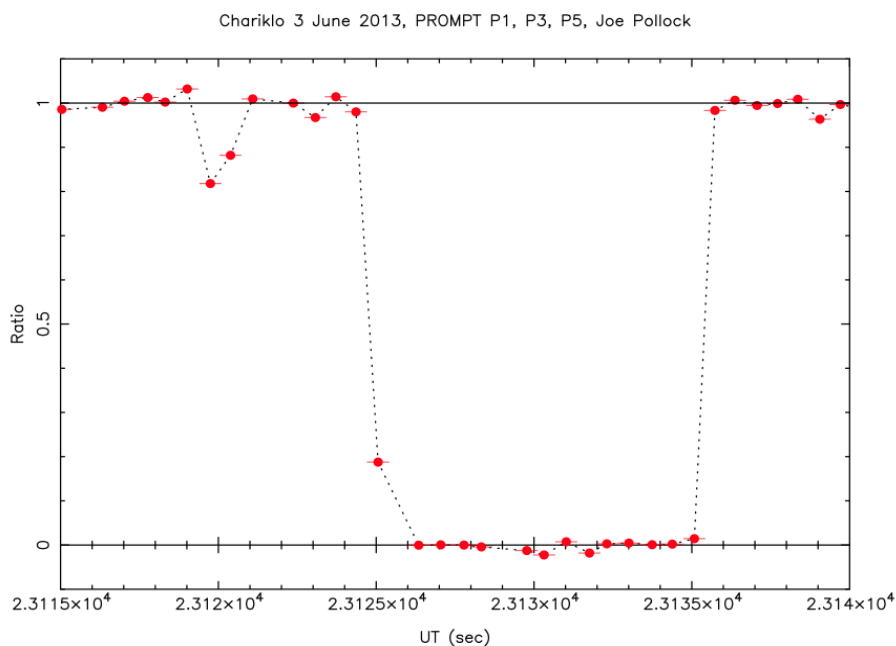


FIGURE 8.17 – Représentation graphique du flux lumineux observé à Cerro Tololo par le télescope PROMPT. Un événement secondaire est facilement identifiable environ 5 secondes avant l'occultation. L'événement symétrique n'a pas été observé, celui-ci étant très certainement intervenu durant un des Dead Time (Figure 7.6).

5) SOAR

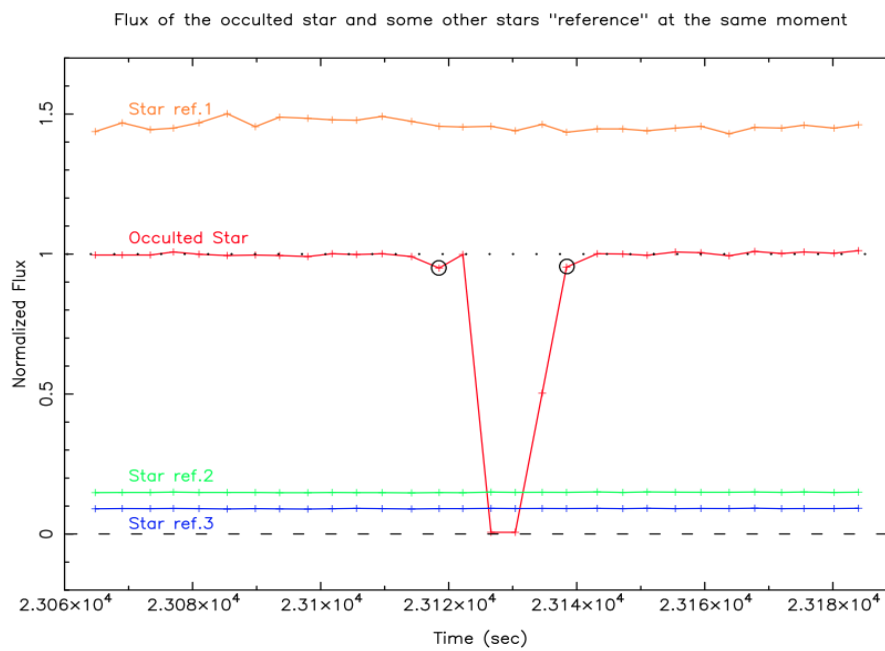


FIGURE 8.18 – Représentation graphique du flux lumineux observé à Cerro Pachon par le télescope SOAR. En plus du flux de l'étoile occultée, nous avons ajouté le flux lumineux observé pour des étoiles voisine au même moment. Cela a permis de prouver que les deux événements secondaires observés ne trouvent pas leur origine dans une perturbation atmosphérique.

6) Bosque Alegre

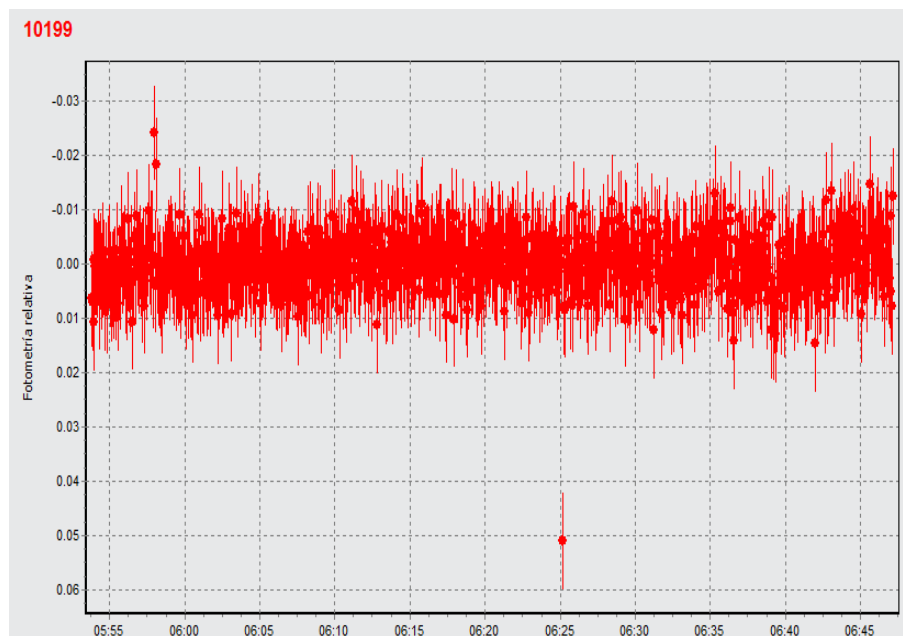


FIGURE 8.19 – Représentation graphique du flux lumineux observé à Bosque Alegre. L'événement principal n'a pas été observé. On identifie qu'un seul événement secondaire mais la chute du flux est facilement identifiable (temps de pose = 3s). Le fait de ne pas observer de seconde chute du flux apporte cependant une contrainte très forte : pour coller à nos observations, l'anneau doit forcément «passer» par le Dead Time de 0.57s

7) Santa Martina

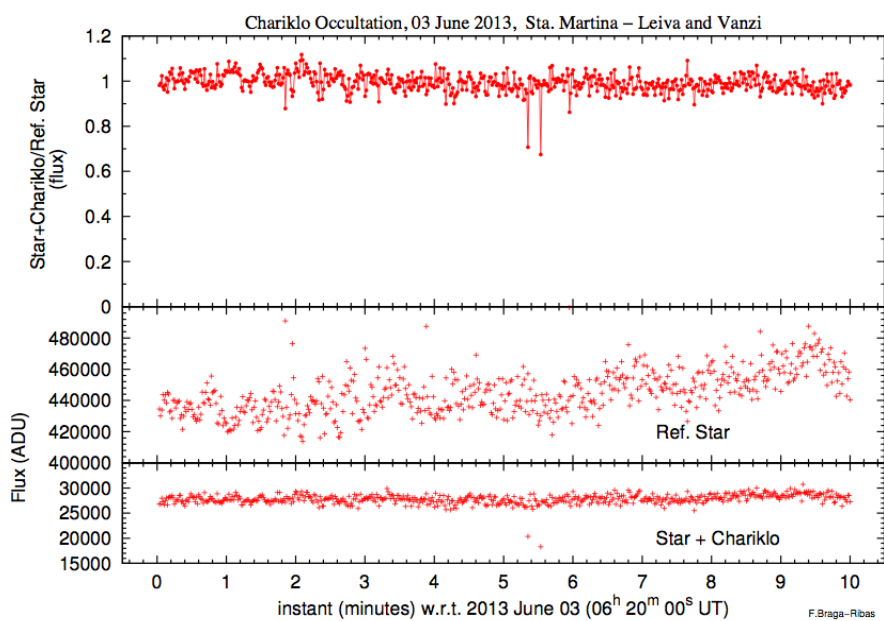


FIGURE 8.20 – Représentation graphique du flux lumineux observé à Santa Martina. L'événement principal n'a pas été observé, mais on identifie très clairement deux événements secondaires au moment où l'occultation aurait pu avoir lieu si celle-ci avait été visible.

C) Fits des T_{imm} et de Fit T_{eme}

1) TRAPPIST avec les courbes de χ^2

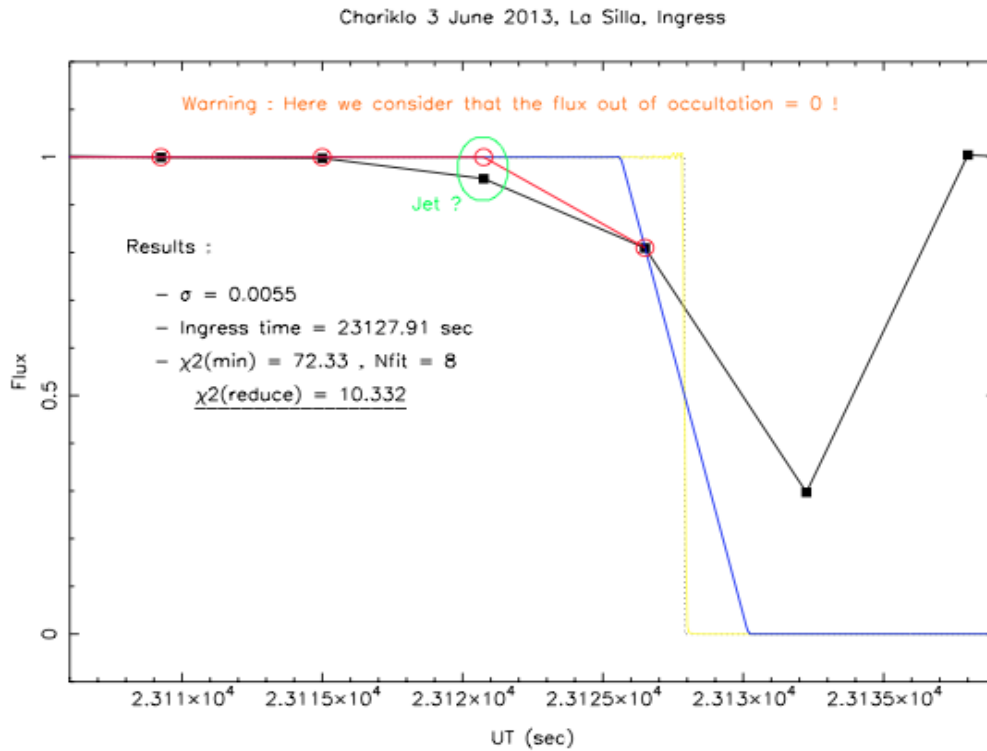


FIGURE 8.21 – Meilleur fit pour T_{imm} au TRAPPIST (La Silla)

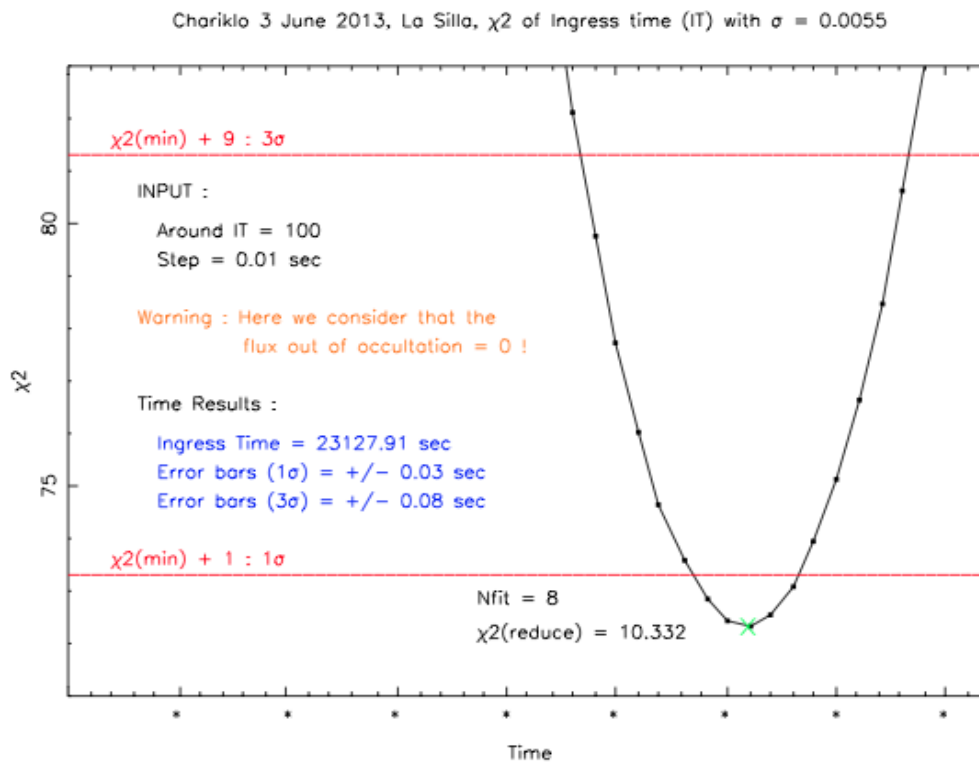


FIGURE 8.22 – Courbe du χ^2 associée à ce T_{imm} au TRAPPIST (La Silla). Pour une raison inconnue, le programme a eu un bug dans l'affichage de l'axe des abscisses.

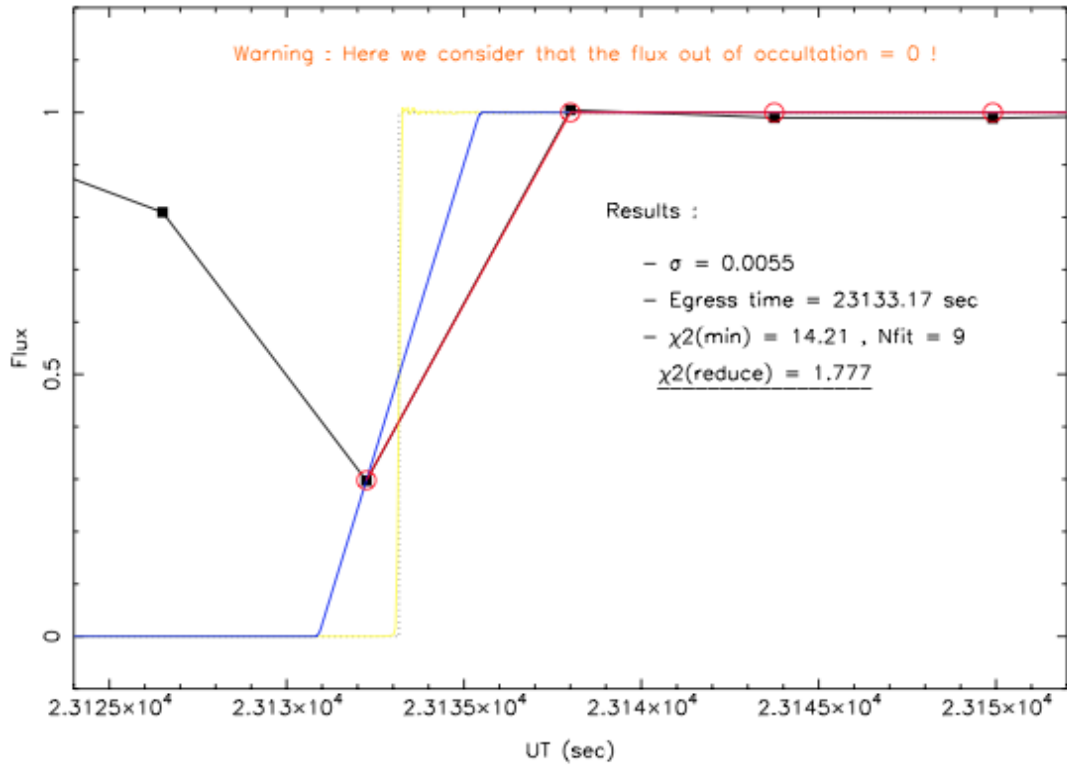


FIGURE 8.23 – Meilleur fit pour T_{eme} au TRAPPIST (La Silla)

Chariklo 3 June 2013, La Silla, χ^2 of Egress time (ET) with $\sigma = 0.0055$

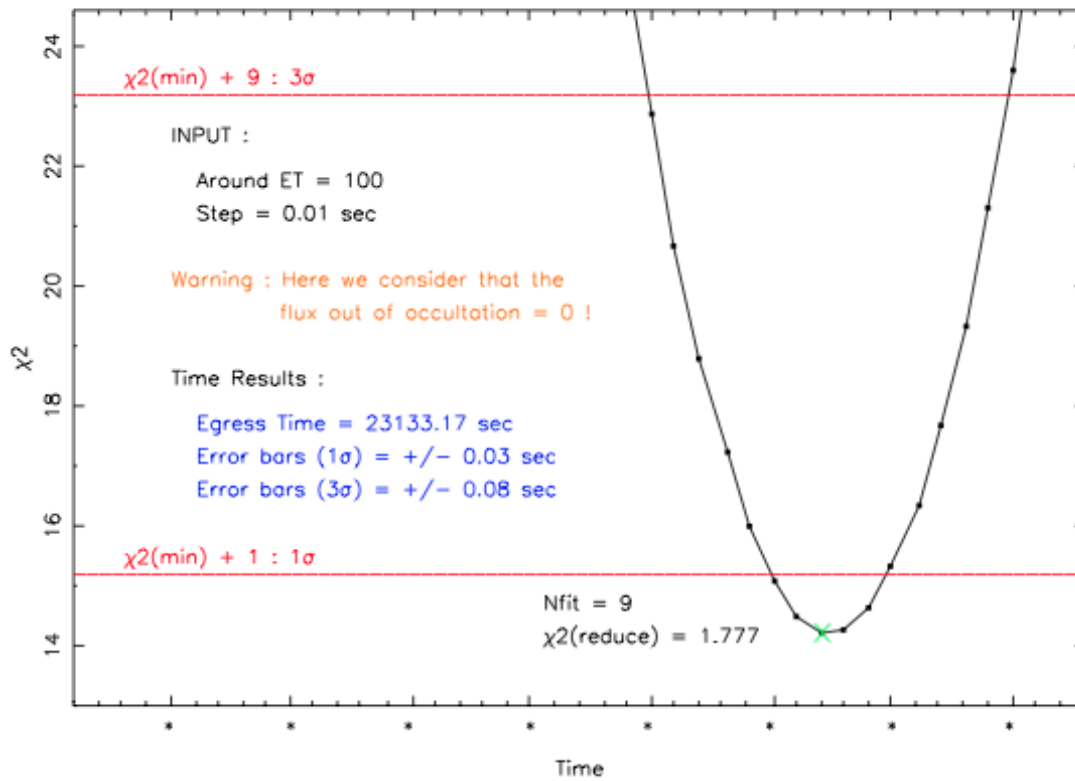


FIGURE 8.24 – Courbe du χ^2 associée à ce T_{eme} au TRAPPIST (La Silla). Pour une raison inconnue, le programme a eu un bug dans l'affichage de l'axe des abscisses.

2) Danish

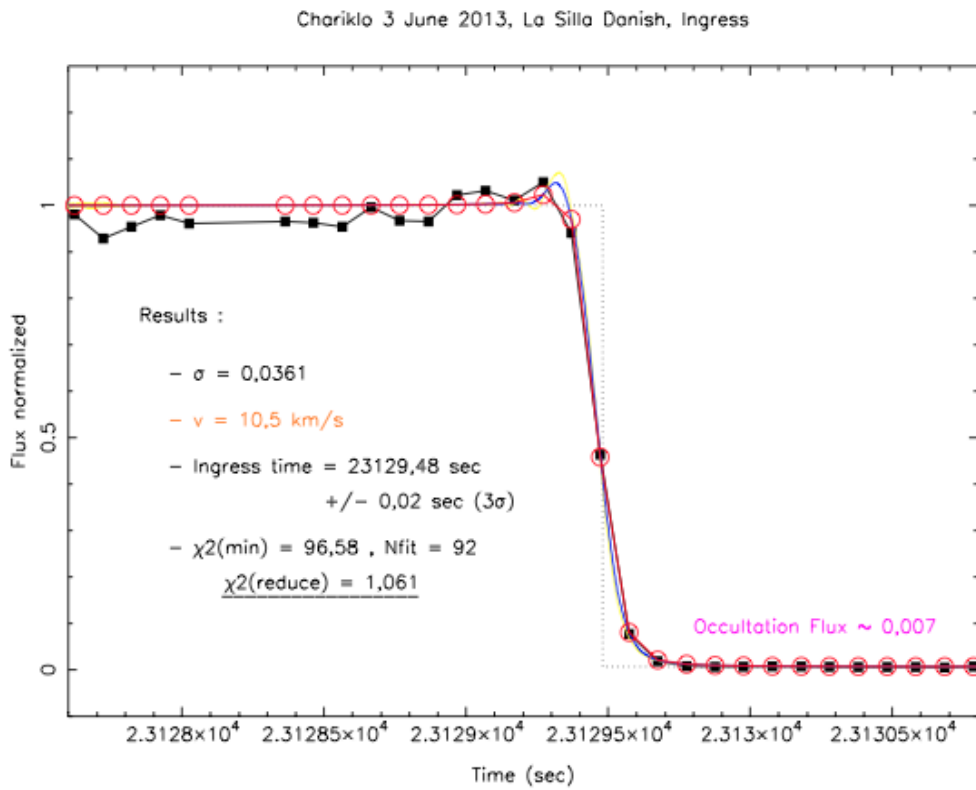


FIGURE 8.25 – Meilleur fit pour T_{imm} au Danish (La Silla)

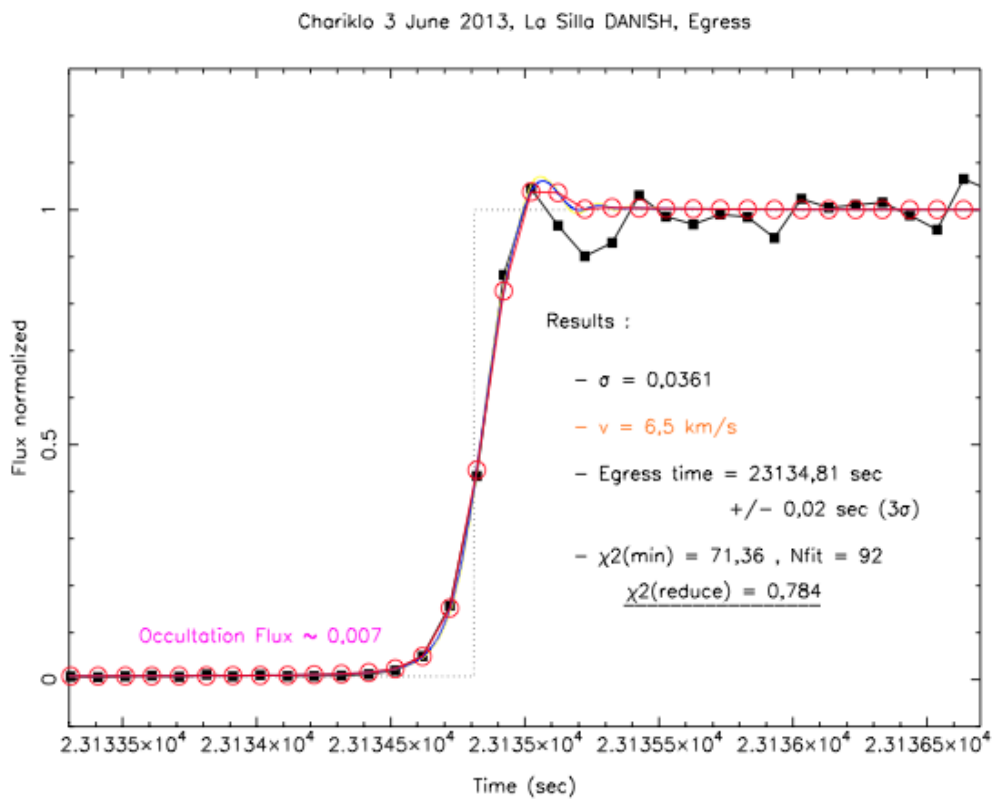


FIGURE 8.26 – Meilleur fit pour T_{eme} au Danish (La Silla)

3) SOAR avec les courbes de χ^2

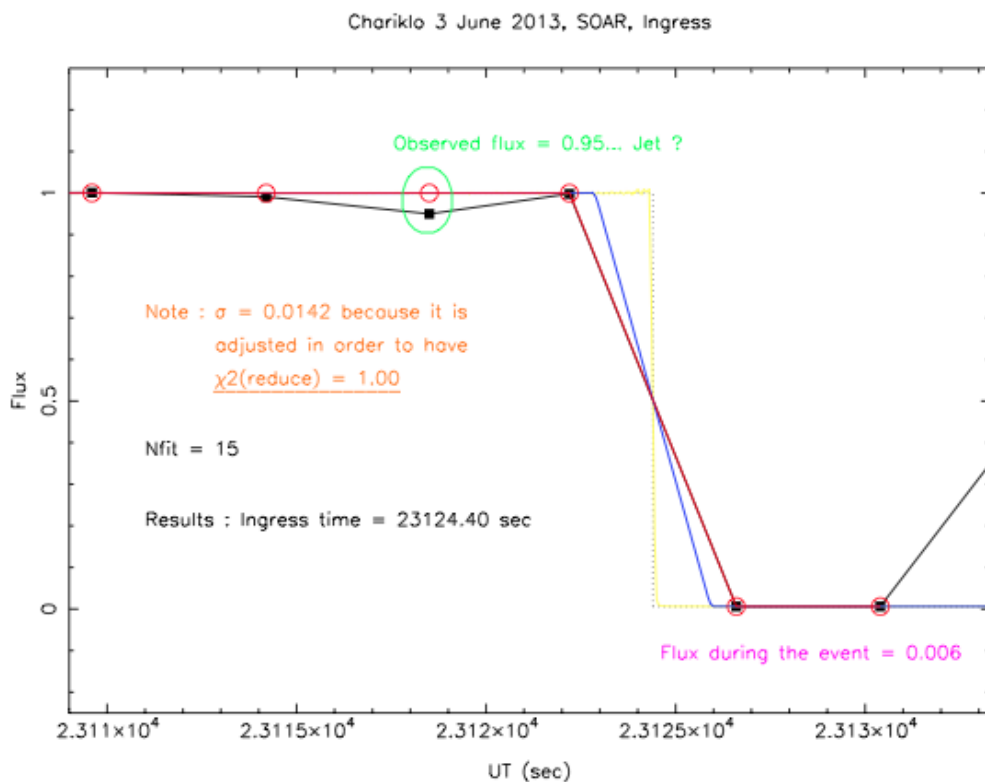


FIGURE 8.27 – Meilleur fit pour T_{imm} au SOAR

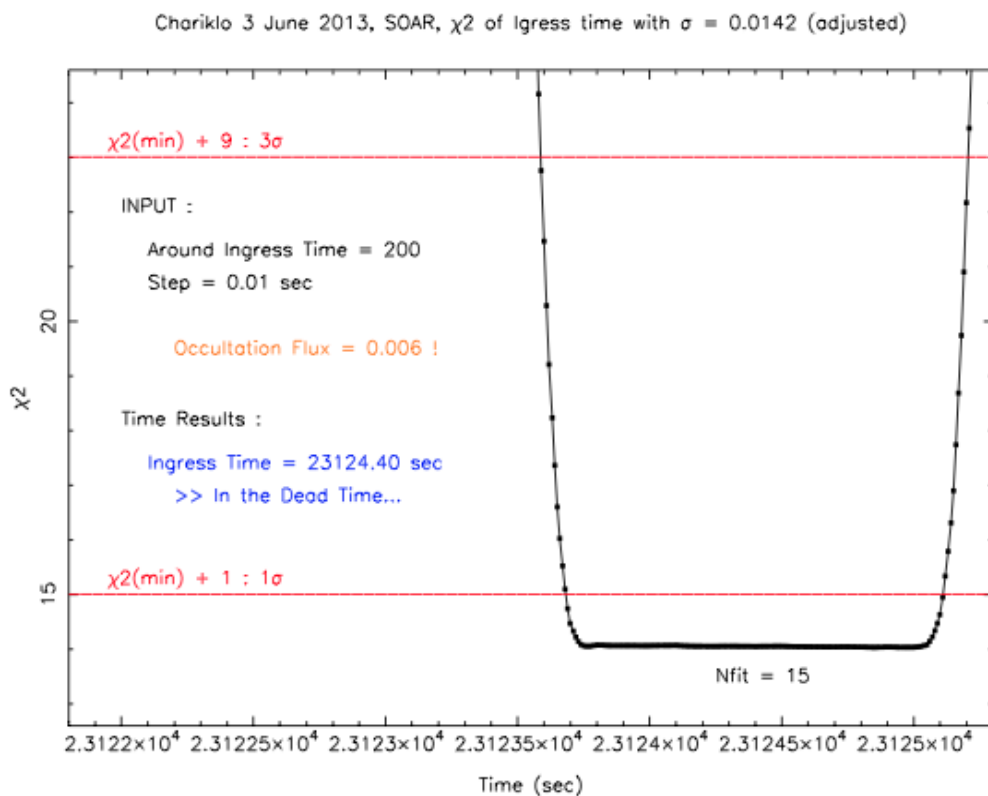


FIGURE 8.28 – Courbe du χ^2 associée à ce T_{imm} au SOAR. Pour une raison inconnue, le programme a eu un bug dans l'affichage de l'axe des abscisses.

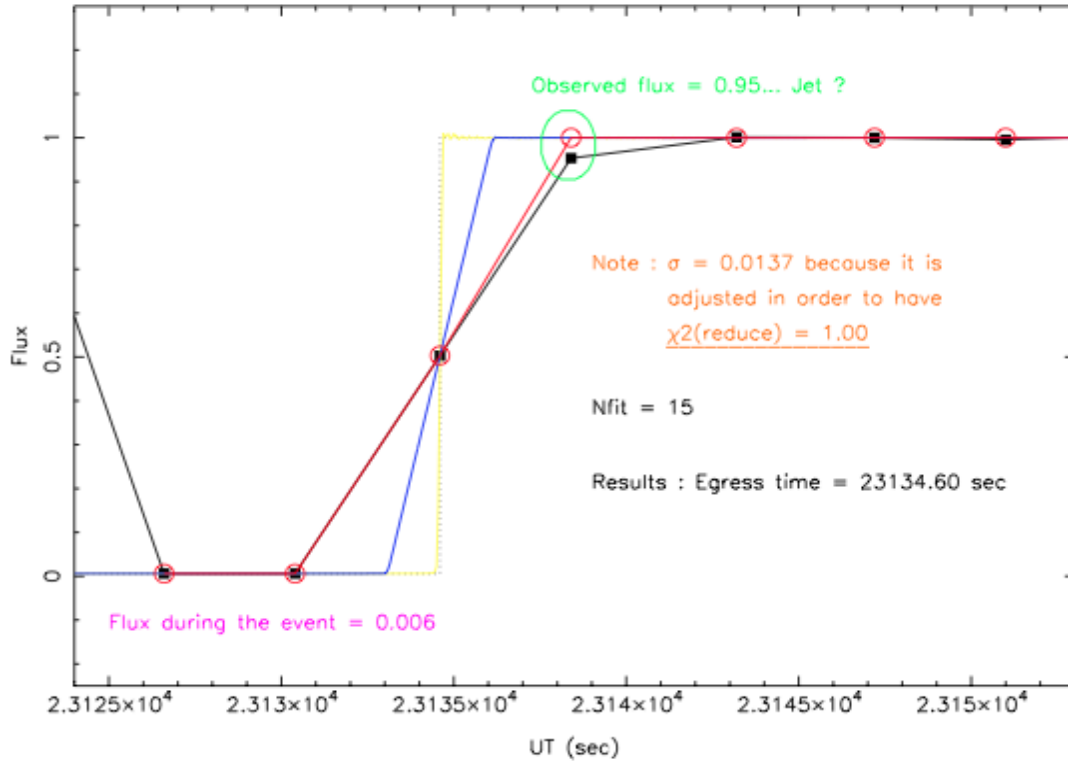


FIGURE 8.29 – Meilleur fit pour T_{eme} au SOAR

Chariklo 3 June 2013, SOAR, χ^2 of Egress time with $\sigma = 0.0137$ (adjusted)

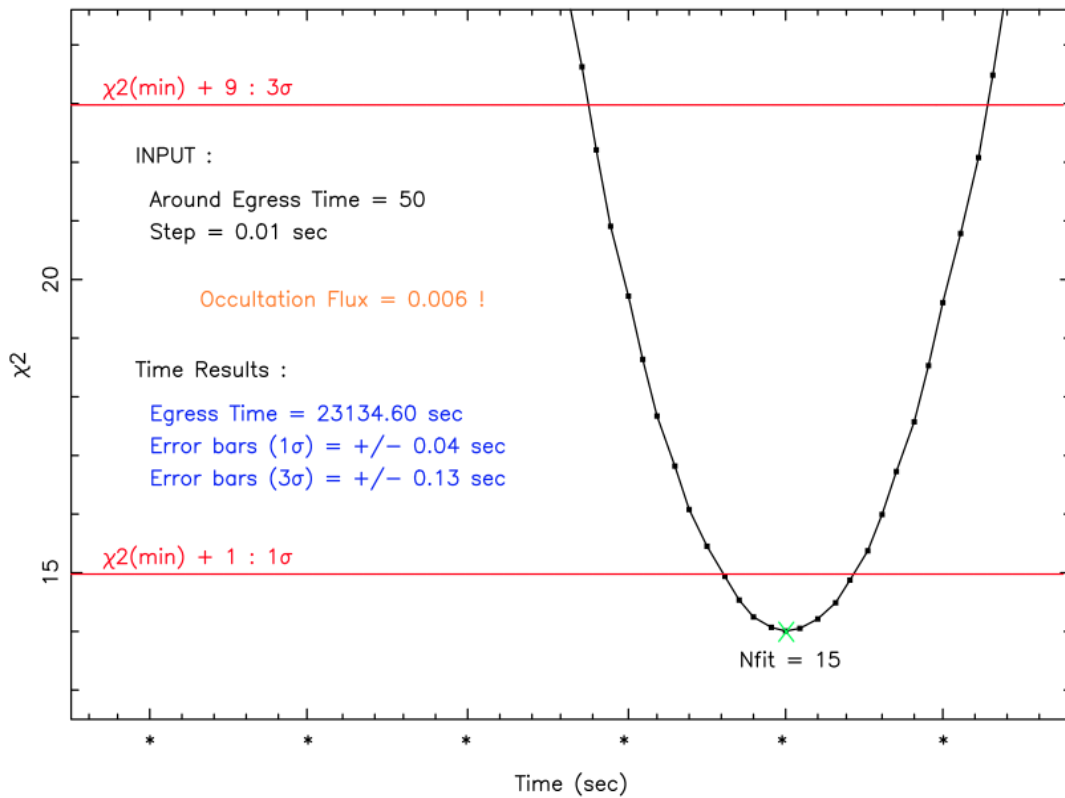


FIGURE 8.30 – Courbe du χ^2 associée à ce T_{eme} au SOAR. Pour une raison inconnue, le programme a eu un bug dans l'affichage de l'axe des abscisses.

4) PROMPT

Chariklo 3 June 2013, PROMPT (all), Ingress

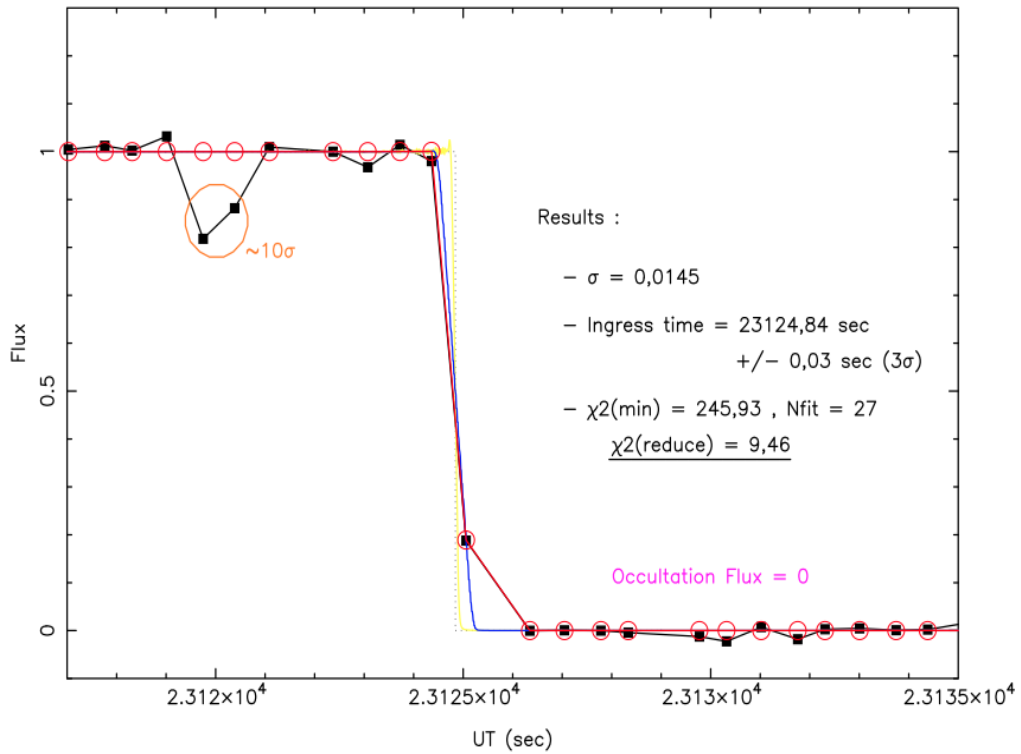


FIGURE 8.31 – Meilleur fit pour T_{imm} au PROMPT

Chariklo 3 June 2013, PROMPT (all), Egress

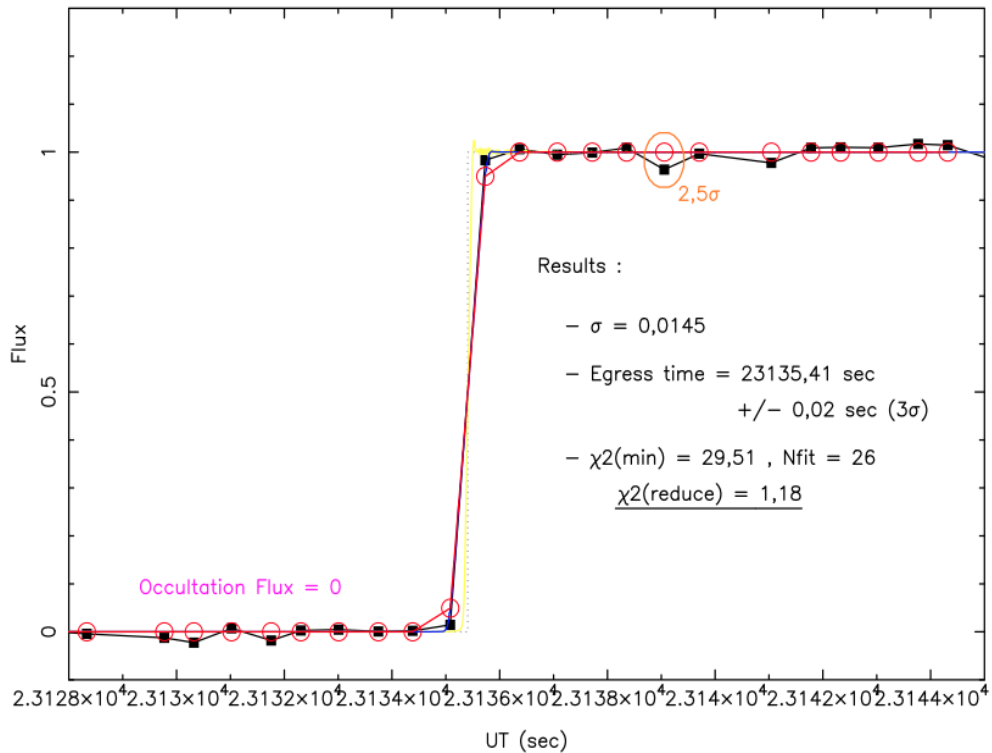


FIGURE 8.32 – Meilleur fit pour T_{eme} au PROMPT

IV.) KX14

Une autre occultation a été travaillé durant le stage, mais le travail est trop peu conséquent et les résultats encore insuffisant pour le mettre en avant ailleurs qu'ici. C'est une occultation stellaire par un TNO nommé KX14, datant d'Avril 2012. Une seule corde d'occultation a été obtenu, et voici ce que j'ai pu faire sur les temps T_{imm} et T_{eme} .

A) Fit T_{imm} avec sa courbe de χ^2

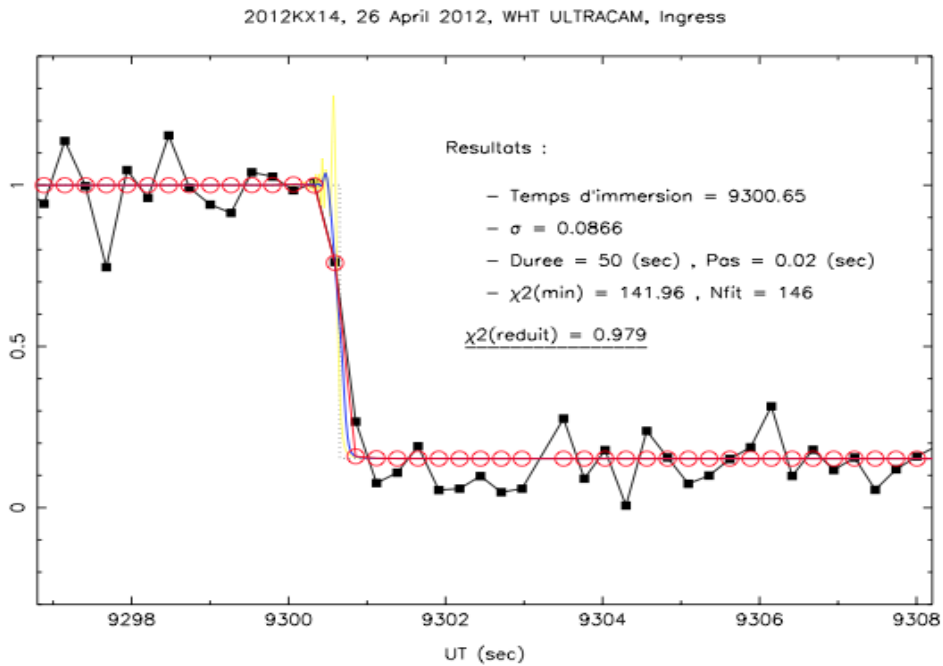


FIGURE 8.33 – Meilleur fit pour T_{imm} de KX14

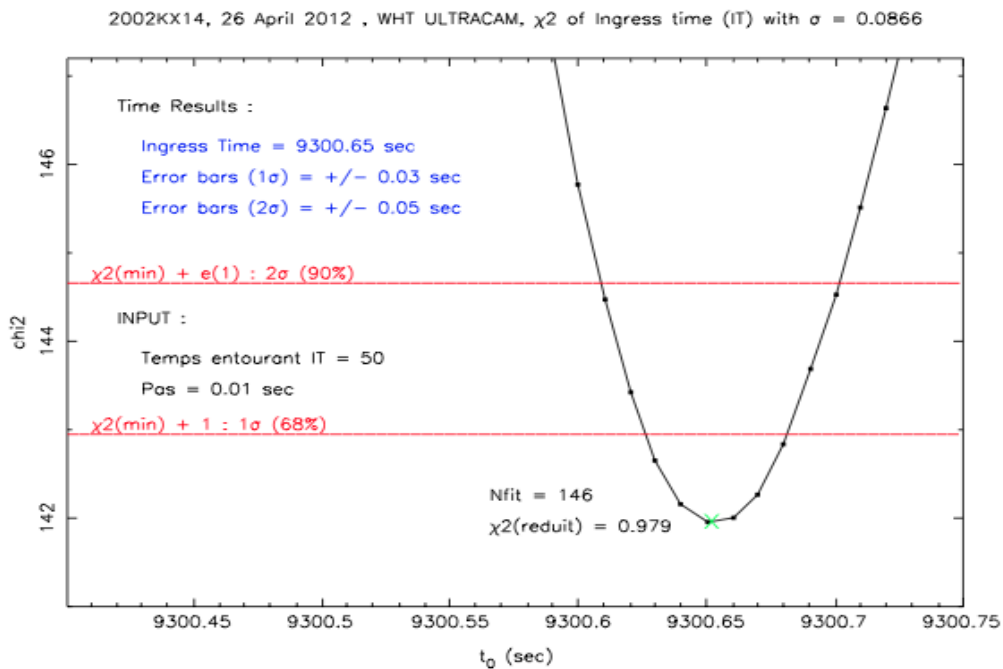


FIGURE 8.34 – Courbe du χ^2 associée à ce T_{imm} de KX14

B) Fit T_{eme} avec sa courbe de χ^2

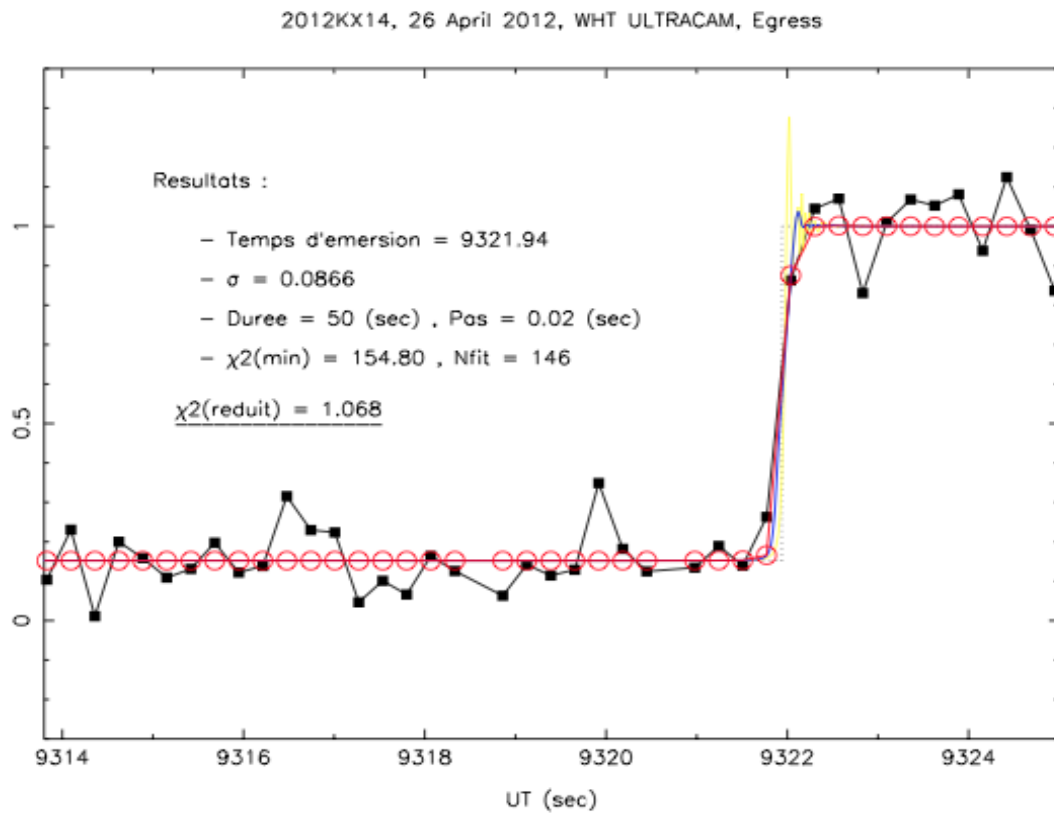


FIGURE 8.35 – Meilleur fit pour T_{eme} de KX14

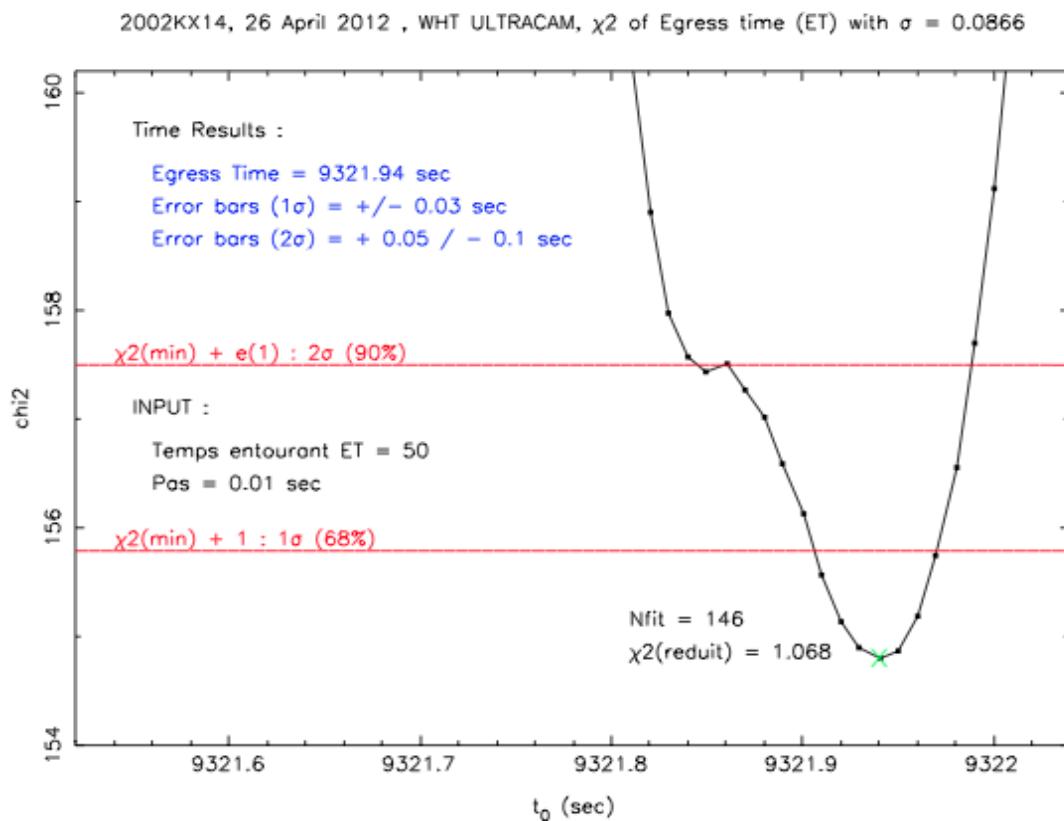


FIGURE 8.36 – Courbe du χ^2 associée à ce T_{eme} de KX14

Bibliographie

- Assafin M., Camargo J. I. B., Vieira Martins R., et al.**, 2010, *Precise predictions of stellar occultations by Pluto, Charon, Nix, and Hydra for 2008-2015*, *Astronomy & Astrophysics*, 515, A32
- Barucci M. A., Boehnhardt H., Cruikshank D. P., Morbidelli A. and Dotson R.**, 2008, *The Solar System Beyond Neptune (book)*.
- Belskaya I. N., et al.**, 2010, *Polarimetry of Centaurs (2060) Chiron, (5145) Pholus and (10199) Chariklo*, *Icarus*, 210, 472-479
- Berthier J.**, 1997, *PhD : Astrométrie des occultations d'étoiles par les astéroïdes*.
- Brown M.**, 2001, *The inclination distribution of the Kuiper belt*, *The Astronomical Journal*, 121, 2804-2814
- Brown M. E., Trujillo C. A. and Rabinowitz D. L.**, 2005, *Discovery of a Planetary-sized Object in the Scattered Kuiper Belt*, *The Astrophysical Journal, Letters*, 635, L97
- Chamberlin A. B.**, 2008, *JPL's Asteroid and Comet Database - Custom Web-based Tools*, *Bulletin of the American Astronomical Society*, 40, 435
- Chandrasekhar S.**, 1987, *Ellipsoidal figures of equilibrium*, New York : Dover, 1987
- Dones L., Weissman P., Levison H. and Duncan M.**, 2004, *Oort cloud formation and dynamics*, In *Comets II* (M. C. Festou et al., ed), 153-174, Univ. of Arizona, Tucson
- Doressoundiram A., et al.**, 2002, *The color distribution in the Edgeworth-Kuiper belt*, *The Astronomical Journal*, 124, 2279-2296
- Elliot J. L., Olkin C. B., Dunham E. W., et al.**, 1995, *Jet-like features near the nucleus of Chiron*, *Nature*, 373, 46-49
- Fornasier S., Lellouch E., et al.**, July 2013, *TNOs are Cool : A survey of the trans-Neptunian region. VIII. Combined Herschel PACS and SPIRE observation of 9 bright targets at 70-500 μm* , *Astronomy & Astrophysics*, 555, 2279-2296
- Gladman B., Marsden B. G. and Vanlaerhoven C.**, 2008, *Nomenclature in the Outer Solar System*, *The Solar System Beyond Neptune*, 43
- Gomes R., Levison H. F., Tsiganis K. and Morbidelli A.**, 2005, *Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets*, *Nature*, 435-466
- Groussin O., Lamy P. and Jorda L.**, 2004, *Properties of the nuclei of Centaurs Chiron and Chariklo*, *Astronomy & Astrophysics*, 413, 1163-1175, DOI : 10.1051/0004-6361 :20031564
- Guilbert-Lepoutre A.**, 2011, *A thermal evolution model of Centaur 10199 Chariklo*, *The Astronomical Journal*, 141, 103

- Gulbis A. A. S., et al.**, 2006, *The color of the Kuiper belt core*, Icarus, 183, 168-178
- Høg E., et al.**, 2000, *The Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars*, Astronomy & Astrophysics, 355, L27
- Jewitt D. and Luu J.**, 1993, *Discovery of the candidate Kuiper belt object 1992QB1*, Nature, 362, 730
- Jewitt C. and Sheppard S. S.**, 2002, *Physical properties of Trans-Neptunian Object (20000) Varuna*, The Astronomical Journal, 123, 2110-2120
- Lacerda P. and Jewitt D. C.**, 2007, *Densities of Solar System Objects from their rotational light curves*, The Astronomical Journal, 133, 1393
- Lellouch E., et al.**, 2002, *Coordinated thermal and optical observations of Trans-Neptunian object (20 000)Varuna from Sierra Nevada*, Astronomy & Astrophysics, 391, 1133-1139
- Lellouch E., Sicardy B., de Bergh C., et al.**, 2009, *Pluto's lower atmosphere structure and methane abundance from high-resolution spectroscopy and stellar occultations*, Astronomy & Astrophysics, 495, L17
- Licandro J., Oliva E. and Di Martino M.**, 2001, *NICS-TNG infrared spectroscopy of transneptunian objects 2000 EB173 and 2000 WR106*, Astronomy & Astrophysics, 373, L29-L32
- Monet D. G., Levine S. E., Canzian B., et al.**, 2003, *The USNO-B Catalog*, The Astronomical Journal, 125, 984
- Peixinho N., et al.**, 2001, *Photometric Study of Centaurs 10199 Chariklo (1997CU26) and 1999UG5*, Astronomy & Astrophysics, 371, 753
- Perryman M. A. C., Lindegren L., Kovalevsky J., et al.**, 1997, *The HIPPARCOS Catalogue*, Astronomy & Astrophysics, 323, L49
- Sicardy B., Colas F., Maquet L., et al.**, 2010, *The 2010 February 19 stellar occultation by Varuna*, Bulletin of American Astronomical Society, 42, 993
- Sicardy B., Ortiz J. L., Assafin M., et al.**, 2011, *A Pluto-like radius and a high albedo for the dwarf planet Eris from an occultation*, Nature 478, 493-496
- Stansberry J., et al.**, 2007, *Physical Properties of Kuiper Belt and Centaur Objects : Constraints from Spitzer Space Telescope*, arXiv :astro-ph/0702538
- Stern S. A. and Colwell J. E.**, 1997, *Collisional erosion in the primordial edgeworth-Kuiper belt and the generation of the 30-50 AU Kuiper gap*, The Astrophysical Journal, 490, 879-882
- Trujillo C., et al.**, 2001, *Properties of the trans-Neptunian belt : Statistics from the Canada-France-Hawaii Telescope Survey*, Astron. J., 122, 457-473
- Zacharias N., Urban S. E., et al.**, 2004a, *The Second US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC2)*, The Astronomical Journal, 127, 3043
- Zacharias N., Finch C. T., et al.**, 2010, *The third US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC3)*, The Astronomical Journal, 139, 2184